

晶体管及其应用

王新贤 张兆虎 徐素颖 编著
贾士伟 张佳莹 李艳英 胡玉萍

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了各种晶体管的工作原理、性能特点、主要参数和典型应用；同时将众多知识点梳理成表格形式，便于理解和记忆，易学易用，也突出了电子技术特色和工具书特点。全书内容分为7章，包括PN结、二极管、晶体三极管、晶闸管、场效应管、光电器件和特殊二极管。

全书立足于知识普及与技术创新，坚持器件与应用并重，知识与技术融合的原则，是极具参考价值的实用书籍。本书适合电子技术领域从业人员、爱好者、初学者阅读，是电子、计算机、自动化、测量类专业大、中专学生的优秀读物，也是电子、自动化和电工工程师应对知识老化的好帮手。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

晶体管及其应用/王新贤等编著. —北京：电子工业出版社，2015.4

ISBN 978-7-121-25702-5

I. ①晶… II. ①王… III. ①晶体管 IV. ①TN32

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第050843号

策划编辑：曲 昕

责任编辑：夏平飞 特约编辑：郭茂威

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：21.75 字数：564千字

版 次：2015年4月第1版

印 次：2015年4月第1次印刷

定 价：49.90元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

PN 结是半导体技术的基石，简单而神奇，掌握其形成机理和性能特点就为后续的专业学习奠定了坚实的基础。各种晶体管的性能差异在很大程度上取决于其内部 PN 结的数量及相互位置的配制。各类晶体管的工作原理、性能特点、主要参数、实用电路及检测方法是专业学习和工作必备的知识点。

为适应电子技术的迅速发展，直面知识老化，着力构筑课堂通往实用的桥梁，促进新器件的推广和应用，本书在选材方面，既重视广泛应用的传统器件，更看重新推出、适应新需求的新器件及实用技术；在编排方面，采用文字、图和表格解说模式，简洁直观，一目了然，可适应快节奏的需求；在内容组织方面，力求知识与技术融合，理论与实用相接，在深入分析和讲解典型器件的同时，比较详细地介绍了主要新器件及其应用；在编写时，注意突出重点，深入浅出、图表并用，语言通俗、行文流畅。本书具有鲜明的电子技术普及和实用特色，同时又详略得当、广集资源、扩大视野，具有工具书的特点，便于随时查阅。鉴于部分器件在电子、电工领域都有应用，所以书中有意模糊了电子和电工的界限，以适应现实的需要。

本书对各种晶体管知识、技术的广度和深度仔细斟酌，兼顾内容的知识性、技术先进性和实用性，以及工具性，利于技术普及、学以致用和知识更新。特别适合电子技术领域从业人员、爱好者、初学者阅读，是电子、自动化、计算机、测量类专业的大、中专学生和研究生优选读物，也是电子、自动化与电工工程师和教师应对知识老化的好帮手和极具参考价值的实用书籍。

多位作者参与了本书的编写工作，第 1 章由王新贤、范明通编写；第 2 章由张兆虎、王立敏编写；第 3 章由王新贤、李艳英编写；第 4 章由王新贤、张佳莹编写；第 5 章由王新贤、贾士伟编写；第 6 章由王新贤、胡玉萍编写；第 7 章由徐素颖、王新贤编写。

由于编著者的学识和能力有限，书中难免有不尽人意之处，甚至失误，敬请读者不吝指教！

编著者
2014 年 11 月

目 录

第1章 PN结	1
1.1 制造PN结的材料——半导体	1
1.1.1 半导体基本知识	1
1.1.2 半导体的性能特点及参数	5
1.2 PN结的生成	6
1.2.1 PN结的形成过程	6
1.2.2 PN结的特性	7
1.3 半导体器件及命名	9
1.3.1 器件类型	9
1.3.2 半导体器件型号的命名	10
第2章 二极管	15
2.1 基本知识	15
2.1.1 符号与结构	15
2.1.2 工作原理及类型	18
2.2 二极管的特性与参数	20
2.2.1 伏安特性	20
2.2.2 技术参数	21
2.3 二极管的用途与检测	23
2.3.1 二极管的用途	23
2.3.2 二极管的检测	23
2.4 整流二极管	24
2.4.1 基本知识	24
2.4.2 整流模块	25
2.4.3 整流二极管的选用和检测	29
2.5 检波二极管	29
2.5.1 基本知识	30
2.5.2 特性与参数	31
2.5.3 检波二极管应用电路	32
2.6 开关二极管	34
2.6.1 基本知识	34
2.6.2 原理与参数	34
2.6.3 常用开关二极管	35
2.6.4 开关二极管实用电路	38
第3章 晶体三极管	40
3.1 结构和原理	40

3.1.1	基本知识	40
3.1.2	三极管的电流放大原理	42
3.1.3	主要特性	44
3.1.4	特性参数	46
3.2	低频放大器	53
3.2.1	静态工作点	53
3.2.2	单管小信号放大器	54
3.2.3	两级耦合放大器	55
3.3	差分放大器	57
3.3.1	零点漂移及补偿	57
3.3.2	差分放大器的构成及原理	58
3.4	反馈放大电路	60
3.4.1	反馈放大电路的构成	60
3.4.2	负反馈放大电路分析	61
3.4.3	射极跟随器	63
3.4.4	常见负反馈放大电路	64
3.5	功率放大器	65
3.5.1	大功率三极管	65
3.5.2	大功率三极管主要参数	66
3.5.3	达林顿管	68
3.5.4	功放电路	72
3.6	开关三极管及应用	78
3.6.1	开关三极管	78
3.6.2	三极管开关电路	83
3.6.3	脉冲的基本知识	84
3.6.4	逻辑电路	86
3.6.5	三极管振荡电路	88
3.7	三极管的辨识与检测	90
3.7.1	三极管的辨识	90
3.7.2	三极管的检测	91
3.8	新型晶体管	93
3.8.1	数字晶体管	93
3.8.2	异质结双极型晶体管	98
第4章	晶闸管	101
4.1	基本知识	101
4.1.1	符号与分类	101
4.1.2	结构与工作原理	102
4.1.3	特性与参数	104
4.1.4	串并联及保护	106

4.1.5 晶闸管模块	108
4.1.6 晶闸管保护	112
4.2 触发电路	114
4.2.1 晶闸管控制极特性	114
4.2.2 单结晶体管	115
4.2.3 可编程单结晶体管 (PUT)	118
4.2.4 实用电路	120
4.2.5 检测与判断	123
4.3 可控整流与逆变电路	123
4.3.1 单相整流	124
4.3.2 三相整流器	128
4.3.3 逆变器	132
4.4 双向晶闸管	136
4.4.1 基本结构和工作原理	136
4.4.2 特性与参数	138
4.4.3 交流调压	139
4.5 开关晶闸管与晶闸管开关电路	140
4.5.1 开关晶闸管	140
4.5.2 硅开关	143
4.5.3 晶闸管开关电路	145
4.6 其他晶闸管	147
4.6.1 门极可关断晶闸管	147
4.6.2 逆导晶闸管	149
4.6.3 快速晶闸管	151
4.6.4 温控晶闸管	153
4.6.5 光控晶闸管	156
4.6.6 光耦晶闸管	159
第5章 场效应管	161
5.1 场效应管的结构与原理	161
5.1.1 场效应管的基本知识	161
5.1.2 场效应管的基本原理	163
5.1.3 结型场效应管的特性曲线	167
5.1.4 NMOS 管的特性曲线	168
5.1.5 场效应管的主要参数	169
5.2 场效应管的基本放大原理	171
5.2.1 共源极放大器	171
5.2.2 共漏极放大器	173
5.2.3 共栅极放大器	173
5.3 其他场效应管	174

5.3.1	VMOS 和 TMOS 场效应管	174
5.3.2	DMOS (即 π MOS) 场效应管	175
5.3.3	MESFET 场效应管	177
5.3.4	TFT 场效应管	178
5.4	场效应管的识别与检测	179
5.4.1	场效应管的识别	180
5.4.2	场效应管的检测	181
5.5	场效应管的应用电路	182
5.5.1	场效应管在电源电路中的应用	182
5.5.2	场效应管在逆变电路中的应用	185
5.5.3	场效应管在驱动电路中的应用	186
5.5.4	场效应管的其他几种应用电路	189
5.6	IGBT 的原理及应用	191
5.6.1	IGBT 的基本知识	191
5.6.2	工作原理	193
5.6.3	主要参数和特性	194
5.6.4	驱动原理及应用	196
第 6 章	光电器件	198
6.1	光电二极管	198
6.1.1	基本知识	198
6.1.2	工作原理与工作模式	201
6.1.3	光电二极管特性	202
6.1.4	主要技术参数	203
6.1.5	常用光电二极管	205
6.1.6	光电二极管的应用	206
6.1.7	光电二极管的检测	209
6.2	光电三极管	209
6.2.1	光电三极管基本知识	209
6.2.2	工作原理	210
6.2.3	特性曲线	211
6.2.4	主要参数	213
6.2.5	光电三极管的检测与识别	214
6.2.6	应用电路	214
6.3	发光二极管	215
6.3.1	发光二极管基本知识	215
6.3.2	LED 特性	219
6.3.3	LED 参数	220
6.3.4	术语及应用	222
6.3.5	红外发光二极管	223

6.3.6	其他发光二极管	227
6.3.7	发光二极管的封装	235
6.3.8	LED 显示器	236
6.3.9	LED 显示屏	239
6.3.10	发光二极管的驱动电路	241
6.3.11	应用与检测	243
6.4	光电耦合器	245
6.4.1	基本知识	246
6.4.2	工作原理及特性	247
6.4.3	主要参数及特点	248
6.4.4	检测与应用	249
6.5	激光二极管	251
6.5.1	基本知识	251
6.5.2	产生机理和工作原理	254
6.5.3	主要特性和参数	255
6.5.4	常见激光二极管类型及特点	258
6.5.5	应用与检测	261
第7章	特殊二极管	263
7.1	稳压管	263
7.1.1	稳压管基本知识	263
7.1.2	工作原理及特性曲线	265
7.1.3	技术参数	266
7.1.4	特殊的稳压管稳压方式	268
7.1.5	稳压电路	269
7.1.6	其他应用	271
7.1.7	三端稳压管	272
7.1.8	稳压管的辨别与检测	276
7.2	变容二极管	277
7.2.1	变容二极管基本知识	277
7.2.2	工作原理及特性	278
7.2.3	主要参数	279
7.2.4	应用与检测	281
7.3	肖特基二极管	282
7.3.1	肖特基二极管基本知识	282
7.3.2	工作原理与特性	284
7.3.3	特点与参数	284
7.3.4	应用与检测	285
7.4	PIN 二极管	286
7.4.1	基本知识	286

7.4.2	特性与参数	288
7.4.3	典型应用	290
7.5	其他二极管	291
7.5.1	隧道二极管	291
7.5.2	快恢复二极管	294
7.5.3	双向二极管	297
7.5.4	其他特殊二极管	300
附录 A	晶体管的封装形式	317

第 1 章 PN 结

PN 结是一种简单而神奇的结构，它是半导体器件和集成电路的基本构件，是现代电子和微电子技术的基石。

一个 PN 结可构成一个二极管；两个 PN 结可以做成一个三极管；三个 PN 结便可形成一个电力电子器件——晶闸管；四个 PN 结就可构成双向晶闸管；一块集成电路中会有许许多多的 PN 结。当然这不是 PN 结的简单叠加和堆积，而是要有精确设计为前提、精细材料作基础、精密工艺作保障的。

PN 结的性能特点不仅取决于材料和制造工艺，而且与外加电压的大小和方向有关，还明显受工作环境条件的影响。

PN 结都是用什么材料制成的？工作原理是什么？又有什么性能特点呢？

1.1 制造 PN 结的材料——半导体

半导体是一种晶体，拥有整齐的结构和规则的几何形状。半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间，是单向导电材料；它可以形成 PN 结，进而制造各种半导体器件和集成电路。半导体对光照、温度、湿度、电场、磁场、压力等外界因素的变化通常十分敏感。目前应用最广的半导体材料是硅、碳化硅、锗和砷化镓等。

1.1.1 半导体基本知识

1. 常用半导体材料

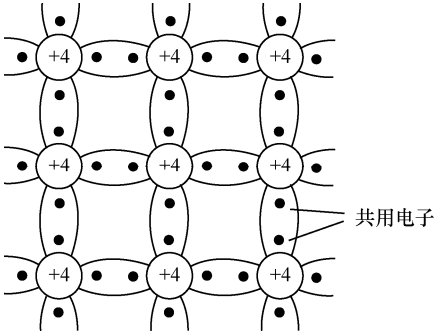
常用半导体材料有元素半导体、化合物半导体、非晶态与液态半导体、本征半导体和杂质半导体，其中杂质半导体中又有 P 型半导体和 N 型半导体。

1) 元素半导体	元素半导体是由单一元素制成的半导体材料。在元素周期表中有多种具有半导体特性的元素，其中主要有硅、锗、硒等，以硅材料应用最为广泛。
2) 化合物半导体	<p>(1) 无机化合物半导体：可分为二元系、三元系、多元系等。二元系化合物半导体是由两种元素化合而成的，主要有碳化硅、砷化镓、磷化铟、碲化锌、硫化锌等化合物。三元系和多元系化合物半导体主要有镓铝砷固溶体、镓锗砷磷固溶体等。</p> <p>化合物半导体器件具有优良特性，在高频、大功率、高效率等方面与硅基集成电路形成互补，广泛用于无线通信、电力电子、光纤通信等领域。例如，以砷化镓（GaAs）为代表的第二代半导体材料已广泛应用于无线及光电通信中；以碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）为代表的第三代半导体材料能制成大功率模块、SiCMOSFET、IGBT 等新型半导体器件。</p> <p>(2) 有机化合物半导体：有机化合物半导体主要有萘、聚丙烯腈和一些芳香族化合物等几十种，但它们真正用作半导体器件的制造材料尚待时日。</p>

3) 非晶态与液态半导体	非晶态与液态半导体同晶态半导体的最大区别是不具有规则排列的晶体结构。非晶态半导体的导电特性也比较复杂，其实用技术仍在试验和深入研究中。
--------------	---

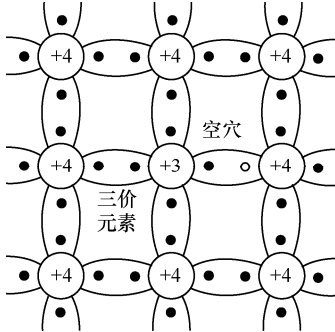
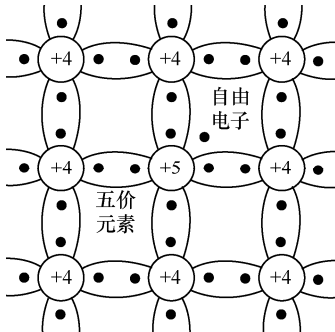
2. 本征半导体及其性能特点

本征半导体是没有掺入杂质且无晶格缺陷的纯净半导体。

1) 常用本征半导体的原子结构	最常用的本征半导体硅和锗都是四价元素，其原子结构的最外层有 4 个电子，每个电子带一个负电荷；原子核带有 4 个正电荷，电子围绕原子核转动，整个原子呈电中性。
2) 共价键结构 在硅（或锗）半导体的晶体结构中，每一个原子都与相邻的四个原子结合在一起，组成共价键结构，如图 1-1 所示。	<div></div> <p>图 1-1 硅晶体的共价键结构</p>
3) 共用电子	相邻两个原子的一对外层电子不但各自围绕自身所属的原子核运动，而且出现在相邻原子所属的轨道上，成为共用电子，如图 1-1 所示。
4) 本征激发	共价键中的共用电子从外界获得一定的能量（如光照、温升、电磁场激发等）就可能挣脱共价键的束缚而成为自由电子。这种现象称为本征激发。
5) 电子-空穴对	共价键中的共用电子受激发成为自由电子的同时，在共价键中便留下一个空位（即空穴）。这种成对出现的自由电子与空穴称为电子-空穴对。
6) 复合	当自由电子在运动过程中遇到空穴时会填充进去恢复一个共价键，并导致一个电子-空穴对的消失，这一过程称为复合。复合是激发的逆过程。
7) 空穴运动	在本征半导体中，当空穴出现时，相邻原子的电子会移动过来填补这个空穴而使相邻原子的共价键中出现一个新的空穴，新空穴又会被相邻原子的电子填补，再出现新的空穴，如此等等。这种电子填补空穴的运动相当于带正电荷的空穴在运动，且运动方向与电子运动方向相反。这种运动被称为空穴运动。通常把空穴看成是一种带正电荷的载流子（即运载电荷的粒子）。
8) 本征导电	电子和空穴都是能自由移动而成为运载电荷的粒子，所以都被称为载流子。电子的移动称为电子导电，空穴的移动称为空穴导电。由于电子、空穴的移动而形成的混合型导电称为本征导电。
9) 动态平衡	在一定温度下，本征半导体中电子-空穴对的产生与复合同时存在，当两者速度相等时便形成相对平衡（即动态平衡）。达到动态平衡的本征半导体具有一定的载流子浓度，也具有一定的电导率。
10) 电子电流和空穴电流	在外加电场的作用下，自由电子产生的定向移动形成电子电流；电子在一定的方向依次填补空穴，犹如空穴产生了定向移动，形成空穴电流。电子电流加空穴电流就是本征半导体的电流。自由电子和空穴所带电荷极性不同，运动方向也相反。

3. 杂质半导体

杂质半导体是通过扩散工艺，在本征半导体中掺入少量杂质元素而形成的半导体。半导体中的杂质对其电导率的影响非常大。杂质半导体一般可分为带负电荷的 N 型半导体和带正电荷的 P 型半导体，它们是在本征半导体中扩散不同的杂质而形成的两种类型的半导体。

<p>1) P 型半导体</p> <p>P 型半导体（也称空穴型半导体）是在纯净的硅或锗等半导体材料中加入微量三价元素硼、铟、镓或铝等形成的以空穴导电为主的半导体。</p>	<p>在 P 型半导体中，带正电荷的空穴为多数载流子，带负电荷的自由电子为少数载流子，如图 1-2 所示。图中，硼元素在结构中顶替了一个硅原子，因硼外层只有 3 个电子，使得与硼相连的 4 个原子结构元中有一个是单电子在运转，于是就有了电子空位，即空穴。</p>  <p>图 1-2 空穴的产生</p>
<p>2) N 型半导体</p> <p>N 型半导体（也称电子型半导体）是在纯净硅或锗等半导体材料中加入微量五价元素磷、锑、砷等形成的以电子导电为主的半导体，如图 1-3 所示。图中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子。</p>	<p>在合适范围内，掺入的杂质越多，多数载流子（即自由电子）的浓度就越高，导电性能就越强。</p>  <p>图 1-3 自由电子的形成</p>

4. 碳化硅半导体

碳化硅（俗称金刚砂，简称 SiC）为硅与碳组成的化合物，碳化硅在自然界以矿物的形式存在，碳化硅约有 250 种结晶形态。纯的碳化硅是无色的，碳化硅耐温可高达 2000℃ 以上。

<p>1) 碳化硅与其他半导体材料性能比较</p> <p>碳化硅半导体和其他半导体材料主要性能比</p>	<p>碳化硅半导体具有禁带宽度大、电子漂移速度快、击穿电场强度高、热导率好、介电常数低、抗辐射能力强等优良的物理化学性能和电学特性。在高温、高频、大功率、抗辐射、不挥发存储器、短波光电子器件和光电集成电路等场合和领域是理想的半导体材料。</p>
--	--

较见表 1-1。	<table><tr><th colspan="5">表 1-1 主要半导体材料性能比较</th></tr><tr><th></th><th>硅</th><th>砷化镓</th><th>氮化镓</th><th>SiC</th></tr><tr><td>大功率适用性</td><td>中</td><td>低</td><td>高</td><td>高</td></tr><tr><td>高频适用性</td><td>低</td><td>高</td><td>高</td><td>中</td></tr><tr><td>高温适用性</td><td>差</td><td>差</td><td>好</td><td>好</td></tr><tr><td>低成本衬底</td><td>是</td><td>否</td><td>是</td><td>否</td></tr></table>	表 1-1 主要半导体材料性能比较						硅	砷化镓	氮化镓	SiC	大功率适用性	中	低	高	高	高频适用性	低	高	高	中	高温适用性	差	差	好	好	低成本衬底	是	否	是	否
表 1-1 主要半导体材料性能比较																															
	硅	砷化镓	氮化镓	SiC																											
大功率适用性	中	低	高	高																											
高频适用性	低	高	高	中																											
高温适用性	差	差	好	好																											
低成本衬底	是	否	是	否																											
2) 主要性能	<p>在碳化硅中掺入杂质氮或磷可以形成 N 型半导体，掺入杂质三价元素铝、硼、镓或铍可以形成 P 型半导体。大量掺杂硼、铝或氮的碳化硅可具备与金属比拟的电导率，甚至可以使碳化硅在 1.5K 的温度下拥有超导性。</p> <p>碳化硅二极管没有普通二极管开关时的反向恢复电流，其导通与关断状态间的转换速度非常快，能耗降低 70%，能够在宽温度范围内保持高效能。</p>																														
3) 主要应用	<p>碳化硅在半导体、太阳能、压电晶体等领域主要用于制造半导体与电子元件、紫外线检测器、耐热元件和高压器件。用碳化硅制造的大功率电子器件主要有场效应管（MOSFET、JFET）、双极晶体管、开关二极管、绝缘栅双极晶体管（IGBT）、蓝光 LED、太阳能电池等，如图 1-4 所示。</p> <p>碳化硅 MOSFET 将会取代太阳能逆变器中的高压硅绝缘栅双极晶体管，这样不仅可降低 50%的能耗，还不需要特殊的驱动电路，且工作频率更高。</p> <div></div>																														

图 1-4 碳化硅半导体应用

5. 砷化镓

砷化镓（简称 GaAs）是一种重要的化合物半导体材料。

1) 分类	<p>(1) 单晶。</p> <p>(2) 外延材料。砷化镓外延材料是采用气相沉积或液相沉积等方法，使镓、砷源或其衍生物在以砷化镓或其他材料为衬底的表面上生成的砷化镓单晶薄膜。衬底和外延层材料相同的为同质结外延层；材料不同的为异质结外延层。外延材料可以是单层结构，也可以是多层结构。</p>
2) 特性	<p>(1) 砷化镓半导体材料与传统的硅材料相比，具有很高的电子迁移率（约为硅材料的 5.7 倍）以及宽的禁带结构，同样条件下可以更快地传导电流。</p> <p>(2) 砷化镓半导体材料具有直接带隙及宽禁带结构等特点，光发射效率高于硅、锗等半导体。</p> <p>(3) 砷化镓半导体具有硅、锗半导体不具备的负阻效应。当对砷化镓半导体施加直流电压时，从零伏（0V）开始，电流与电压呈线性关系，电流随电压的升高而增大，符合欧姆定律。因此砷化镓是一种具有欧姆性质的电阻材料；但当外加电场强度超过 3kV/cm 以后，流过砷化镓半导体材料的电流，却随着电压</p>

2) 特性	的升高而减小，即砷化镓具有负阻效应。3kV/cm 的电场强度称为砷化镓负阻效应的阈值。利用这种负阻效应，砷化镓可以制作微波固体振荡器。
	(4) 微波振荡器采用砷化镓器件后，振荡频率可达 20GHz 或者更高。
	(5) 砷化镓器件具有良好的高频（高于 250GHz）、高温、低温性能和噪声小、抗辐射能力强等优点。
	(6) GaAs 能够发光，可以用来制作红外发光二极管、光探测器、半导体激光器。
	(7) 用砷化镓制作的晶体三极管的放大倍数小、导热性差、功率较小。
	(8) 砷化镓还适合制作微波器件、超晶格结构材料、集成电路、换能器件等。
3) 应用	砷化镓广泛应用在卫星通信、微波点对点传输、雷达系统、遥控、DVD、计算机外设、照明、光电集成、太阳能电池、移动通信、GPS 导航等领域。

1.1.2 半导体的性能特点及参数

1. 性能特点

半导体与导体、绝缘体的区别不仅在于导电能力的不同，更重要的是半导体具有独特的导电特性。

1) 两种载流子	导体内只有一种载流子，即自由电子；而半导体内有两种载流子，即带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。
2) 掺杂性	在纯净的半导体中掺入特定的适量杂质，半导体的导电性能就会极大地提高并可控。利用这一特性可以制造晶体二极管、晶体三极管、晶闸管等多种电子器件。
3) 光电特性	有些半导体在光线照射时导电能力很强，但无光线照射时却不导电。光电二极管、光电三极管等光电器件就是利用半导体的光电特性制成的。
4) 单向导电特性	半导体的导电具有方向性。当两端施加正向电压时导通，加反向电压时截止。整流二极管、开关二极管和检波二极管等器件的工作原理都是基于这一特性。
5) 温度特性	当环境温度升高时，有些半导体的电阻会随着温度的上升而降低，导电能力显著增强，具有负温度系数；也有的半导体却具有相反的温度特性，其电阻随着温度的升高而增加，导电能力显著减弱，具有正温度系数。以此可制造热敏电阻等温度敏感元件。

2. 特征参数

半导体材料的特征参数反映不同半导体材料彼此之间的差别和在不同情况下量的差异。

1) 禁带宽度	禁带宽度的大小主要与半导体的晶体结构和原子的结合性质等有关。禁带宽度实际上是反映电子被束缚强弱程度的一个物理量，是半导体材料原子中的电子从束缚状态激发到自由状态所需要的最小能量。半导体材料不同，禁带宽度也不同。
2) 电阻率	半导体材料电阻率的大小与所含杂质的量有关，并对环境温度、光照、电磁场、压力等外界条件的变化具有很高的敏感性。半导体电阻率的变化范围通常为 $10^{-3} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

3)载流子迁移率	载流子迁移率是指载流子（自由电子和空穴）在单位电场作用下的平均漂移速度。载流子运动越快，迁移率越大，电阻越小，功耗也越小，电流承载能力越大；载流子运动越慢，迁移率越小，电阻越大，电流承载能力越小。同一种半导体材料中的载流子类型不同，迁移率也不同，一般电子的迁移率高于空穴。不同半导体材料的载流子迁移率也往往是不同的。载流子迁移率反映材料的导电能力并影响器件的最高工作频率。
4) 位错密度	<p>位错是晶体中最常见的一类晶体缺陷。位错密度可以用来衡量半导体单晶材料晶格完整性的程度。</p> <p>半导体材料特征参数的数值与材料中的杂质和晶体缺陷密切相关。例如，半导体材料的电阻率因杂质类型和数量的不同而大范围地变化；而载流子迁移率却随着杂质和晶体缺陷的增加而减小。</p>

1.2 PN 结的生成

在半导体基片上通过特定工艺可以形成 P 型半导体和 N 型半导体的交界面，邻近交界面的区域通常称为 PN 结。PN 结有同质结和异质结两种。用相同的半导体材料制成的 PN 结叫同质结，用不同的半导体材料制成的 PN 结叫异质结。

1.2.1 PN 结的形成过程

1. 概念术语

1) 空间电荷区	在 P 型半导体和 N 型半导体结合处附近，扩散到 P 区的自由电子与空穴复合，扩散到 N 区的空穴与自由电子复合。于是在 P 型半导体和 N 型半导体的结合处附近的 P 型区存有负载流子，N 型区存有正载流子，这个存有不能移动载流子的区间称为空间电荷区。
2) 扩散运动	扩散运动是指载流子从高浓度区域向低浓度区域的运动。
3)内电场的形成	由于正负载流子的扩散和存在，空间电荷区形成内电场。空间电荷区加宽，内电场会增强。内电场的方向是由 N 区指向 P 区，它能减缓和阻止扩散运动的进行。
4) 漂移运动	载流子在内电场力作用下的运动称为漂移运动。运动方向与扩散运动的方向相反。
5) 多子与少子	<p>在 N 型半导体中，浓度大于空穴的自由电子称为多子（即多数载流子）；在 P 型半导体中，空穴的浓度大于自由电子的浓度，多子即为空穴。</p> <p>在 N 型半导体中，浓度小于自由电子的空穴为少子（即少数载流子）；在 P 型半导体中，浓度小于空穴的自由电子称为少子。</p>
6) 电子流	在纯净硅晶体上施加电压时，晶体内的自由电子很容易被吸引移向正电压端而形成电流（即电子流），它是半导体中的一种电流形式。
7) 空穴流	电子跳出形成的空穴会有邻近原子的电子来填补而在原来位置形成一个新的空穴，新空穴又会有邻近的电子来补充。这个填补空穴的过程就像空穴在晶体结构中从一个地方移到另一个地方从而形成了空穴流。

2. PN 结形成机理

<p>(1) 在由 P 型半导体和 N 型半导体结合区的两边，电子和空穴的浓度是不同的，这种浓度的差别使电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散。</p> <p>扩散的结果使 P 区一边失去空穴，留下了带负电荷的离子；N 区一边失去电子，留下了带正电荷的离子。半导体中的离子是不能任意移动的，也不参与导电。这些不能移动的带电离子通常称为空间电荷，它们集中在 P 区和 N 区交界面附近，形成了一个很薄的空间电荷区，即 PN 结。</p>
<p>(2) 空间电荷区内正负离子间的相互作用形成了一个内电场。这个电场将使 N 区的少数载流子空穴向 P 区漂移，使 P 区的少数载流子电子向 N 区漂移，漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。漂移运动使内电场增强。</p>
<p>(3) 从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面附近 P 区所失去的空穴，从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面附近 N 区所失去的电子，这就使空间电荷减少，内电场减弱。</p>
<p>(4) 在空间电荷区内，如果多数载流子几乎都扩散到对方，或被对方扩散过来的多数载流子复合，以致使多数载流子被消耗殆尽，所以又称此区域为耗尽区。耗尽区的特点是电阻率很高，为高电阻区。</p>

3. PN 结的平衡状态

<p>载流子的扩散运动使空间电荷区加宽，内电场增强。内电场有利于少子的漂移而不利于多子的扩散；而漂移运动使空间电荷区变窄，内电场减弱，又有利于多子的扩散而不利于少子的漂移。当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时，交界面形成稳定的空间电荷区，即 PN 结处于动态平衡状态。</p> <p>当 PN 结内的温度均匀、稳定，没有外加电场，外加磁场、光照射等外界因素的作用时，宏观上达到稳定的平衡状态称为 PN 结的平衡状态。</p>

1.2.2 PN 结的特性

1. 导电特性

<p>1) 单向导电</p>	<p>当在 PN 结上外加电压时，如果 P 型边接正极，N 型边接负极，电流便从 P 型一边流向 N 型一边；PN 结呈低阻特性，电流容易通过。如果 N 型边接外加电压的正极，P 型边接电压负极，PN 结呈高阻特性，电流很难流过。这就是 PN 结的单向导电性。利用它的单向导电特性可以制造整流二极管、开关二极管和检波二极管等。</p>
<p>2) PN 结的正偏压和正向电流</p>	<p>当外加电压使 PN 结 P 区的电位高于 N 区的电位时，外加电压称为正向电压，简称正偏压或正偏，这时由 P 区流向 N 区的电流称为正向电流。</p>
<p>3) PN 结的反偏压和反向饱和电流</p>	<p>当外加电压使 PN 结 P 区的电位低于 N 区的电位时，外加电压称为反向电压，简称反偏压或反偏，此时由 N 区流向 P 区的电流称为反向电流。当反向电流变得极其微小、且不随外加电压改变而变化的电流称为反向饱和电流。</p>

2. 导通与截止

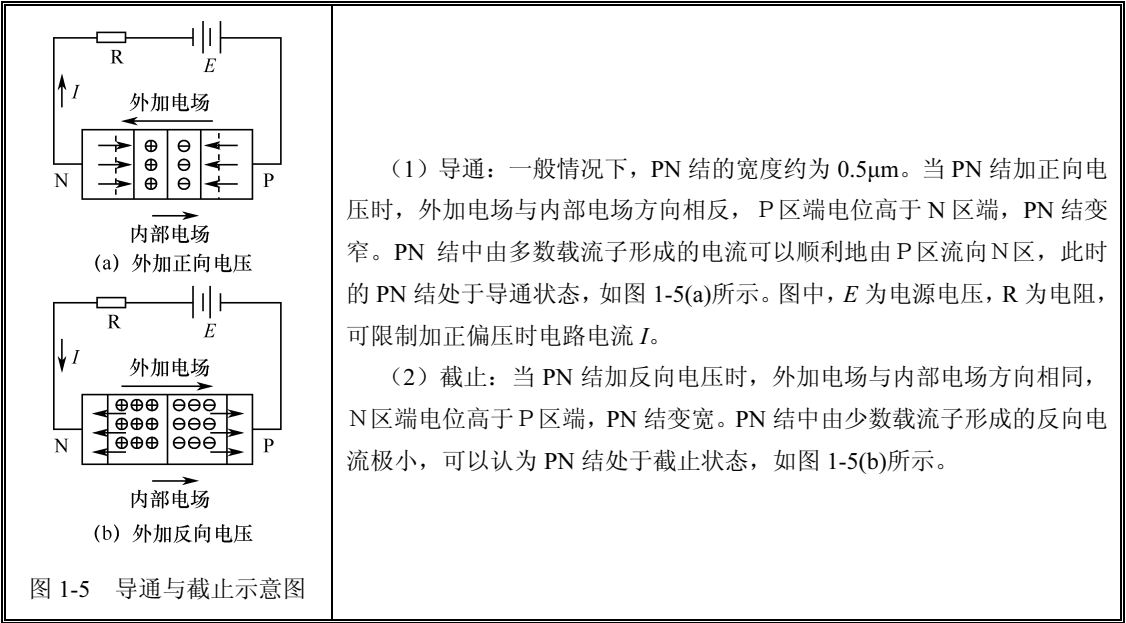


图 1-5 导通与截止示意图

3. PN 结的击穿

当加在 PN 结上的反向电压超过一定数值时，PN 结的电阻会急剧变小，反向电流急剧增大，这种现象称为击穿。击穿可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种，且都是可逆的。

1) 击穿电压	击穿电压是指加在 PN 结上的反向电压增大过程中反向电流突然增大时的电压。如果外电路无限流措施，反向电流会增大到将 PN 结烧断损坏。
2) 齐纳击穿	齐纳击穿的击穿电压通常在 6V 以下，有负的温度系数，即随着温度的升高，击穿电压会降低。 利用齐纳击穿原理可以制作稳压二极管，也称齐纳二极管。
3) 雪崩击穿	雪崩击穿一般发生在掺杂浓度较低的 PN 结中，雪崩击穿电压通常大于 8V，有正的温度系数，即随着温度的升高，击穿电压也会升高。采取适当的掺杂工艺，可将硅 PN 结的雪崩击穿电压控制为 $8\sim1000\text{V}$ 。利用雪崩击穿原理可以制作雪崩二极管。 当外加反向电压为 $6\sim8\text{V}$ 时，两种击穿有可能同时发生。
4) 热击穿	PN 结因温度过高发生的击穿称为热击穿，这时的 PN 结会被烧坏。

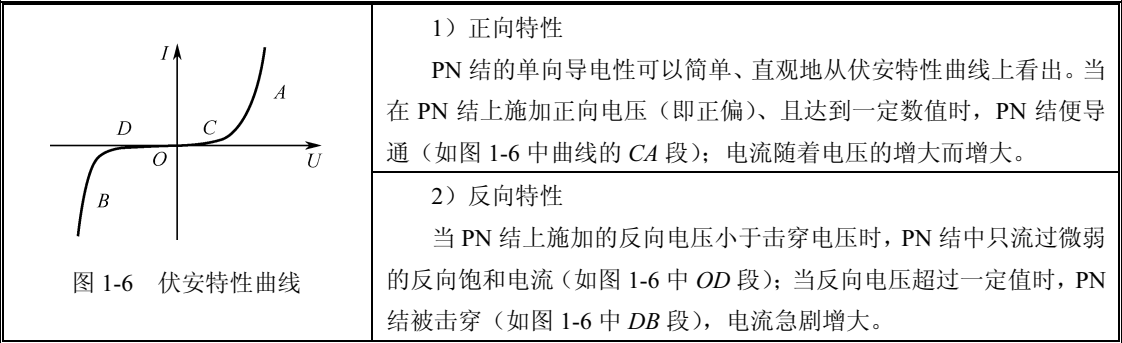
4. PN 结的电容效应

PN 结的电容效应是指在 PN 结上施加反向电压时，空间电荷区中的正负电荷出现的电容效应。这时的 PN 结犹如一个电容器，其电容量的大小随外加电压的变化而变化。利用 PN 结的电容效应可以制作变容二极管。

5. PN 结的伏安特性

PN 结的伏安特性曲线如图 1-6 所示。图中， I 表示通过 PN 结的电流， U 表示加在 PN 结两端的电压；外加电压大于零时所对应的曲线部分称为正向特性，外加电压小于零时所对

应曲线部分称为反向特性。曲线的 OC 段表示即将导通前的状态, CA 段表示正向导通的状态; OD 段表示反向截止状态; DB 段表示 PN 结的击穿状态。



1.3 半导体器件及命名

1.3.1 器件类型

1. 二极管	各种晶体二极管就是利用不同的半导体材料、采用不同的工艺和几何结构研制出来的。它种类繁多、用途各异, 可用来产生、控制、接收、变换或进行能量转换。不同类型二极管的工作频率不同, 可以是超低频、低频、高频、甚高频、特高频等; 其耐压、电流及功率等也各异。
2. 三极管	晶体三极管 (又称双极型晶体管) 是三端器件, 晶体管除了用于放大、振荡、开关外, 还有具有光电变换功能的光电晶体管等特殊用途的晶体管。
3. 场效应管	场效应晶体管 (又称单极型晶体管) 是根据薄层半导体受横向电场影响而改变阻值的现象 (即场效应) 制成的, 具有信号放大和一些特殊功能。
4. 集成电路	集成电路是把晶体二极管、三极管、电阻、电容等按一定规则制作在同一块硅片上制成的。单位硅芯片上集成的元件数小于 100 的称为小规模集成电路, 集成的元件数在 100~1000 个的称为中规模集成电路, 在 1000~100000 个的称为大规模集成电路, 100000 个元件以上的称为超大规模集成电路。
5. 光电探测器	光电探测器可以把微弱的光信号转换成电信号以达到检测光信号的目的。例如, 光敏电阻、光电二极管、光电池等都可以认为是光电探测元件。
6. 发光二极管	半导体发光二极管是指有正向电流通过时可以发光的二极管。发出的光可以是绿光、黄光、红光、蓝光等。
7. 半导体激光器	当高效半导体发光管的发光区处在一个光学谐振腔内时可以获得激光输出。这种器件称为半导体激光器或注入式激光器。
8. 太阳能电池	太阳能电池 (或光电池) 是指在太阳光线照射下, 两端间产生一个电动势, 把光能转换成电能的器件。
9. 晶闸管	晶闸管能在高电压、大电流条件下工作, 具有耐压高、容量大、体积小等优点, 它是大功率开关型半导体器件, 广泛应用在直流输电、可控整流器、逆变器、变频器等电力电子设备中。
10. 其他器件	还有一些特殊的半导体器件也广为应用, 如用于产生锯齿波的单结晶体管;

10. 其他器件	用作摄像器件的电荷耦合器件；接收微弱信号的微波半导体低噪声器件；IGBT 等新型电力电子器件；利用半导体做成的器件还有热敏电阻、霍尔器件、压敏元件、气敏晶体管和表面波器件等。
----------	---

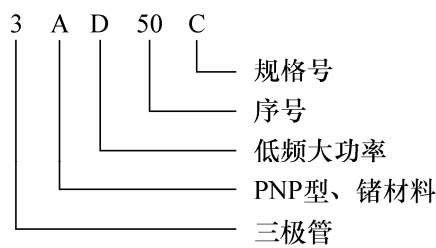
1.3.2 半导体器件型号的命名

1. 我国半导体器件型号命名法

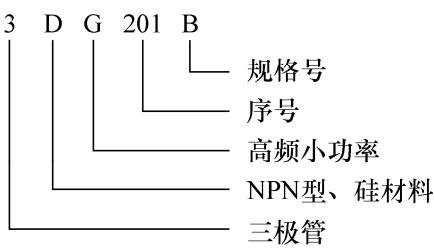
第一部分		第二部分		第三部分				第四部分	第五部分
用数字表示器件电极的数目		用汉语拼音字母表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母表示器件的类型				用数字表示器件序号	用汉语拼音表示规格的区别代号
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义		
2	二极管	A	N 型, 锗材料	P	普通管	D	低频大功率管 ($f_a < 3\text{MHz}, P_c \geq 1\text{W}$)		
3	三极管	B	P 型, 锗材料	V	微波管	A	高频大功率管 ($f_a \geq 3\text{MHz}, P_c \geq 1\text{W}$)	用数字表示器件序号	用汉语拼音表示规格的区别代号
		C	N 型, 硅材料	W	稳压管	T	半导体晶闸管 (可控硅整流器)		
		D	P 型, 硅材料	C	参量管	Y	体效应器件		
		A	PNP 型, 锗材料	Z	整流管	B	雪崩管		
		B	NPN 型, 锗材料	L	整流管	J	阶跃恢复管		
		C	PNP 型, 硅材料	S	隧道管	CS	场效应管		
		D	NPN 型, 硅材料	N	阻尼管	BT	半导体特殊器件		
		E	化合物材料	U	光电器件	FH	复合管		
				K	开关管	PIN	PIN 型管		
				X	低频小功率管 ($f_a < 3\text{MHz}, P_c < 1\text{W}$)	JG	激光器件		
				G	高频小功率管 ($f_a \geq 3\text{MHz}, P_c < 1\text{W}$)				

例如：

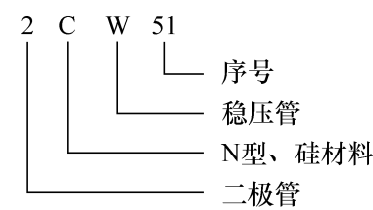
1) 锗材料PNP型低频大功率三极管



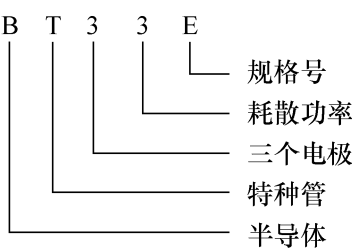
2) 硅材料NPN型高频小功率三极管



3) N型硅材料稳压二极管



4) 单结晶体管



2. 国际电子联合会半导体器件型号命名方法

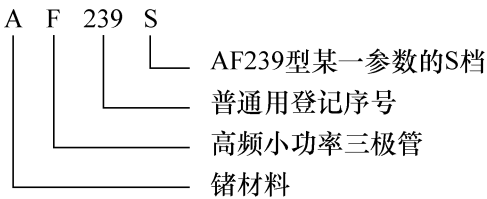
德国、法国、匈牙利、罗马尼亚等欧洲国家，大都采用国际电子联合会半导体器件型号命名法。规定半导体器件型号由四个基本部分组成，各部分的符号及意义如下。

第一部分		第二部分				第三部分		第四部分	
用字母表示使用的材料		用字母表示类型及主要特性				用数字或字母加数字表示登记号		用字母对同一型号分档	
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义
A	锗材料	A	检波、开关和混频二极管	M	封闭磁路中的霍尔元件	三位数字	通用半导体器件的登记序号（同一类型器件使用同一登记号）	A B C D E ⋮	同一型号器件按某一参数进行分档的标志
		B	变容二极管	P	光敏元件				
B	硅材料	C	低频小功率三极管	Q	发光器件				
		D	低频大功率三极管	R	小功率晶闸管				
C	砷化镓	E	隧道二极管	S	小功率开关管	一个字母加两位数字	专用半导体器件的登记序号（同一类型器件使用同一登记号）		
		F	高频小功率三极管	T	大功率晶闸管				
D	锑化铟	G	复合器件及其他器件	U	大功率开关管				
		H	磁敏二极管	X	倍增二极管				
R	复合材料	K	开放磁路中的霍尔元件	Y	整流二极管				
		L	高频大功率三极管	Z	稳压二极管即齐纳二极管				

国际电子联合会晶体管型号命名法的特点：

- ① 管子型号以两个字母开头，并且第一个字母是 A、B、C、D 或 R 的晶体管，大都是欧洲制造的产品。
- ② 第一个字母表示材料（A 表示为锗管，B 表示为硅管）。
- ③ 第二个字母表示器件的类别和主要特点，如 C 表示低频小功率管，D 表示低频大功率管等。
- ④ 第三部分表示登记顺序号。三位数字者为通用品；一个字母加两位数字者为专用品。顺序号相邻的两个型号的特性可能相差很大。例如，AC184 为 PNP 型，而 AC185 则为 NPN 型。
- ⑤ 第四部分字母表示同一型号的器件按某一参数（如 h_{fe} ）进行分档。
- ⑥ 型号中的符号均不反映器件的极性（指 NPN 或 PNP）。

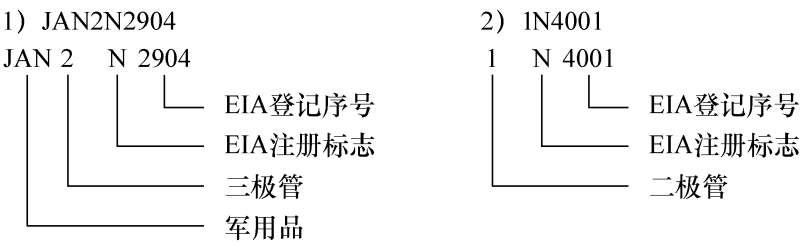
例如：



3. 美国半导体器件型号命名法

美国半导体器件型号无统一命名法。常用的美国电子工业协会（EIA）半导体器件型号的命名由五部分组成，各部分的具体含义如下。

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分		第五部分	
用字符表示用途类型		用数字表示 PN 结的个数		美国电子工业协会 (EIA) 注册标志		美国电子工业协会(EIA) 登记顺序号		用字母表示器件分档	
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义
JAN	军品	1	二极管	N	已在 EIA 注册登记	多位 数字	在 EIA 登记顺序号	A	A 档
J	军品	2	三极管或场效应管					B	B 档
JANTX	特军品	3	有三个 PN 结的器 件如晶闸管					C	C 档
JANTXV	超特军品	<i>n</i>	有 <i>n</i> 个 PN 结的器件					D	D 档
JANS	宇航级								
	非军品								



美国晶体管型号命名法的特点：

- ① 组成型号的第一部分是前缀，第五部分是后缀，中间的三部分为型号的基本部分。
- ② 不同厂家生产的性能基本一致的器件，都使用同一个登记号。同一型号中某些参数差异常用后缀字母 A、B、C、D 等表示同一型号器件的不同档次，因此型号相同的器件可以互换。

但序号相邻的两器件可能特性相差很大。例如，2N3464 为硅 NPN 型高频大功率管，而 2N3465 为 N 沟道场效应管。

③ 登记序号数大的通常是近期产品。例如，JAN2N3251A 表示为 PNP 型硅高频小功率开关三极管。其中，JAN—军品级，2—三极管，N—EIA 注册标志，3251—表示 EIA 登记顺序号是 3251，A—表示是 2N3251 的 A 档产品。

4. 日本半导体器件型号命名方法

日本生产的半导体器件型号由五至七个部分组成。通常只有前五个部分，各部分的符号意义如下。

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分		第五部分	
用数字表示类型或有效电极数		S 表示日本电子工业协会（EIAJ）的注册产品		用字母表示器件的极性 & 类型		用数字表示在日本电子工业协会登记的顺序号		用字母表示对原来型号的改进产品	
符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义	符号	意义
0	光电（即光敏）二极管、晶体管及其组合管	S	表示已在日本电子工业协会（EIAJ）注册登记的半导体分立器件	A	PNP 型高频管	两位以上的数字	从 11 开始，表示在日本电子工业协会注册登记的顺序号，不同公司性能相同的器件可以使用同一顺序号，其数字越大越是近期产品	A B C D E F ⋮	用字母表示对原来型号的改进产品
				B	PNP 型低频管				
				C	NPN 型高频管				
				D	NPN 型低频管				
1	二极管			F	P 控制极晶闸管				
2	三极管、具有两个以上 PN 结的其他晶体管			G	N 控制极晶闸管				
				H	N 基极单结晶体管				
				J	P 沟道场效应管				
				K	N 沟道场效应管				
3	具有四个有效电极或具有三个 PN 结的晶体管			M	双向晶闸管				
⋮									
n-1	具有 n 个有效电极或具有 n-1 个 PN 结的晶体管								

日本半导体器件型号命名法有如下特点：

① 型号中的第一部分是数字，表示器件的类型和有效电极数。例如，0—表示光电（即光敏）二极管、三极管及上述器件的组合，1—表示二极管，2—表示三极管，3—表示具有四个有效电极或具有三个 PN 结的器件。

② 第二部分均为字母 S，表示为日本电子工业协会注册产品。

③ 第三部分用字母表示器件的极性 & 类型。

例如，A—表示 PNP 型高频管，B—表示 PNP 型低频管，C—表示 NPN 型高频管，D—表示 NPN 型低频管，F—表示 P 控制极晶闸管，G—表示 N 控制极晶闸管，H—表示 N 基极单结晶体管，J—表示 P 沟道场效应管，K—表示 N 沟道场效应管，M—表示双向晶闸管。

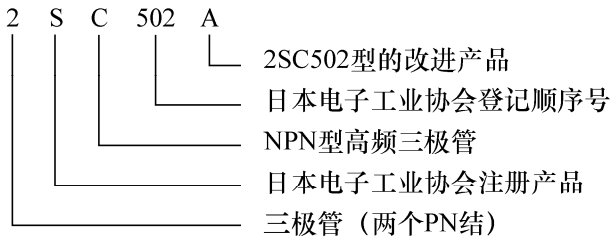
④ 第四部分表示在日本工业协会（EIAJ）的注册登记序号，为两位以上的数字，从 11 开始，不同公司的性能相同的器件可以使用同一顺序号；数字越大，越是近期产品。

序号相邻的两个器件的某一性能可能相差很远。例如，2SC2680 型的最大额定耗散功率为 200mW，而 2SC2681 的最大额定耗散功率为 100W。

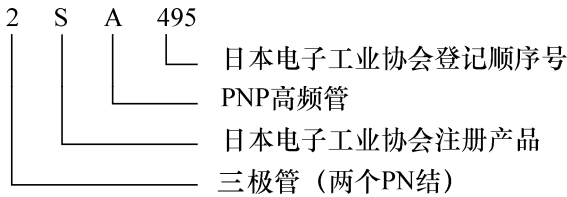
- ⑤ 第五部分用字母表示同一型号的改进型产品。A、B、C、D、E、F 分别表示这个器件是原型号产品的依次改进型产品。
- ⑥ 第六、七两部分的符号和意义各公司不完全相同。
- ⑦ 日本有些半导体器件在外壳上标记型号，常采用简化标记的方法，即把 2S 省略。例如，2SD764 简化为 D764，2SC502A 简化为 C502A。
- ⑧ 日本通常把 $P_{cm} \geq 1W$ 的管子称做大功率管。在低频管（2SB 和 2SD 型）中，也有工作频率很高的管子，如 2SD355 的特征频率 f_T 为 100MHz，所以它们也可当高频管用。

例如：

1) 2SC502A（日本收音机中常用的中频放大管）



2) 2SA495（日本夏普公司GF-9494收录机用小功率管）



第 2 章 二极管

半导体二极管（简称二极管）是半导体器件家族中的元老。它内含一个 PN 结、两个电极，具有单向导电特性，在各种电子装置与设备中广泛应用，如图 2-1 所示。


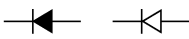


图 2-1 常见二极管

2.1 基本知识

2.1.1 符号与结构

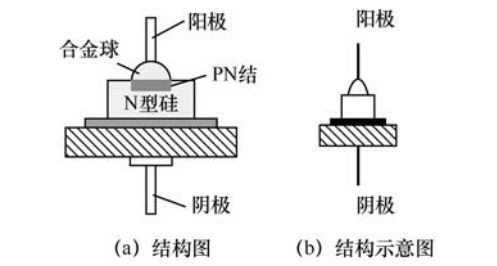
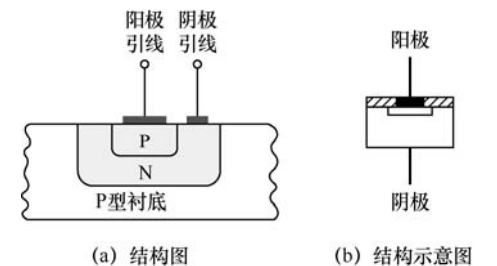
1. 二极管的符号

文字符号	VD，也有用 D 的。
图形符号（见图 2-2）	<div><div></div><div>(a) 国标图形符号</div><div></div><div>(b) 其他图形符号</div></div> <p>图 2-2 普通二极管的图形符号</p>

2. 基本结构

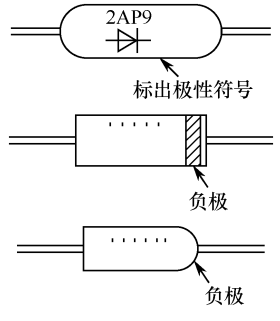
半导体二极管的结构形式主要有点接触型、面接触型和平面型。

结 构	结构图与示意图	说 明
<p>(1) 点接触型二极管管结构（见图 2-3）</p> <p>点接触型二极管是将一根很细的金属丝和一块半导体的表面熔接</p>	<div><div></div><div>(a) 结构图</div><div></div><div>(b) 结构示意图</div></div> <p>图 2-3 点接触型二极管的结构图和结构示意图</p>	<p>点接触型二极管多由锗材料制成，其 PN 结的面积很小、极间电容很小，额定电流也较小，不能承受高的反向电压。但构造简单、价格便宜、高频性能</p>

后、在两端引出电极线（即引脚），再外加管壳密封而成。	国产点接触型二极管的产品系列主要是 2AP 和 2AK。例如，2AP1 是点接触型锗二极管，最大整流电流为 16mA，最高工作频率为 150MHz。	好，一般用于高频和小功率电路中，也可用作数字电路中的开关元件。
<p>（2）面接触型二极管（见图 2-4）</p> <p>面接触型（又称面结型）二极管的 PN 结是用合金法或扩散法制成的。</p>	<div></div> <p>图 2-4 面接触型二极管的结构图和结构示意图</p>	<p>面接触型二极管的 PN 结面积较大，允许较大电流通过；但结电容也较大，工作频率较低。主要用于整流，不宜用于高频电路。</p> <p>国产产品系列主要有 2CZ 和 2CP。例如，2CP1 为面接触型硅二极管，最大整流电流为 400mA，最高工作频率为 3kHz。</p>
<p>（3）平面型二极管（见图 2-5）</p> <p>平面型（又称外延平面型）二极管通常是利用硅片表面氧化膜的屏蔽作用、在 N 型硅单晶片上有选择地扩散 P 型杂质而形成 PN 结。</p>	<div></div> <p>图 2-5 平面型二极管的结构图和结构示意图</p>	<p>平面型二极管允许较大电流通过，且性能稳定可靠，多用于开关、脉冲、高频和集成电路中。</p>

3. 电极标注方法

二极管是由 P 型半导体和 N 型半导体构成的 PN 结加上电极引线及管壳封装而成。由 P 区引出的引线称为正极（即阳极），用字母 A 表示；由 N 区引出的引线称为负极（即阴极），用字母 K 表示。

方 法	说 明
（1）外壳印有二极管图形符号等特殊标记（见图 2-6）	<div></div> <p>图 2-6 常见二极管的正负极标注方式</p>
（2）在外壳一端印制“-”号	表示该端为负极。
（3）采用外形特征标识电极极性	带螺纹的一端是负极。
（4）在外壳上印制字母	P 表示正极（阳极）端、N 表示负极（阴极）端。

(5) 贴片二极管通常在外包装上用一条窄的灰色色带	表示负极端。
(6) 在外壳上印有电极极性色点（白色或红色）	有色点的一端为正极。
(7) 发光二极管的正负极利用引脚长短来标识	长脚为正极，短脚为负极。
(8) 发光二极管的引脚一样长时，管内部面积大的一侧引脚是负极，面积小的一侧引脚是正极（见图 2-7）	<div data-bbox="695 396 893 613"></div> <p>图 2-7 引脚等长发光二极管的正负极</p>

4. 二极管的封装

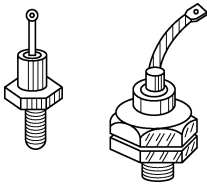
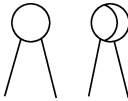
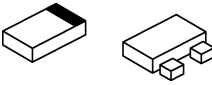
1) 封装形式

二极管的封装形式主要有常规封装和贴装封装。常规封装按结构分为气密封装和实体封装；按材料分为金属封装、陶瓷封装、玻璃钝化封装、玻璃封装、塑料封装和改性环氧树脂封装等。表面贴装器件的封装材料一般采用改性环氧树脂，体积比常规器件要小 20%~80%。大功率二极管多采用金属封装，并且带有螺帽，以便可靠地固定在散热器上。

2) 封装外形示意图

二极管的封装材料不同，其外部形状也不同。常见二极管的封装形状示意图如图 2-8 所示。

塑封二极管	<div data-bbox="635 1081 933 1241"></div> <p>图 2-8 (a) 塑料封装外形示意图</p>
玻璃封装二极管	<div data-bbox="680 1313 893 1513"></div> <p>图 2-8 (b) 玻璃封装外形示意图</p>
金属封装二极管	<div data-bbox="611 1586 960 1728"></div> <p>图 2-8 (c) 金属封装外形示意图</p>

大功率螺旋状金属封装二极管	 图 2-8 （d）大功率管封装外形示意图
微型二极管	 图 2-8 （e）微型管封装外形示意图
贴装二极管	 图 2-8 （f）贴装管封装外形示意图

2.1.2 工作原理及类型

1. 工作原理

1) 加正偏压	<p>（1）正偏：二极管两端加正向电压（即阳极接电源正极或高压端，阴极接电源负极或低压端）时，这种连接方式称为正向偏置（简称正偏）。</p> <p>（2）门槛电压：当所加正向电压低于门槛电压（一般锗管为 0.2V，硅管为 0.6V）时，二极管不导通，管中只有很小的漏电流流过。</p> <p>（3）导通：当所加正向电压高于门槛电压时，二极管开始导通，电流可顺利流过。</p>
2) 加反偏压	<p>（1）反偏：当加在二极管两端的电压为反向电压（即二极管的正极接电源负极或低压端，阴极接电源正极或高压端）时，这种连接方式称为反向偏置（简称反偏）。</p> <p>（2）截止：二极管在反向偏置时，处于截止状态，流过的反向电流很小。</p> <p>（3）反向击穿：当二极管两端的反向电压增大到某一数值（即反向击穿电压）时，反向电流会急剧增大，这种状态称为二极管的反向击穿。</p>

2. 二极管的压降

1) 压降值	二极管的压降（即正向压降）是指二极管在正向电压作用下导通后两端间的电压值。当二极管处于导通状态、流过的电流小于额定电流时，两端间的电压基本保持不变，这个电压称为二极管的正向压降。通常锗管是 0.3V，硅管是 0.7V。
2) 压降值不同	当流过二极管的电流较大（几百毫安至几安）或类型不同时，二极管两极间的压降也会有变化。例如，单个发光二极管的压降一般在 1.5V 左右，肖特基二极管一般是 0.5V 左右。

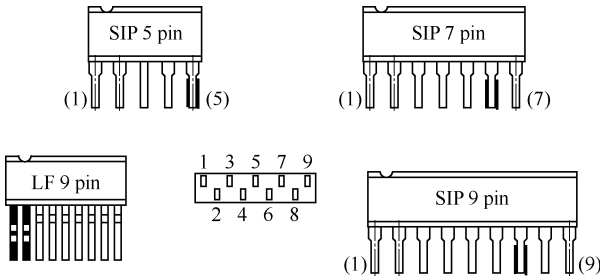
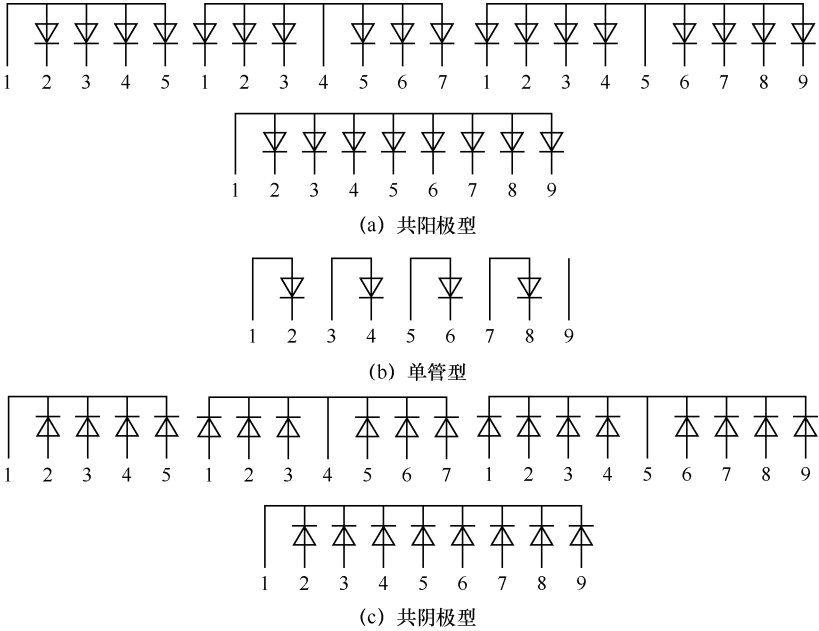
3. 二极管的分类

1) 按制造用的半导体材料	分为锗二极管、硅二极管、砷化镓二极管、碳化硅二极管等。
2) 按管芯结构	分为点接触型二极管、面接触型二极管、平面型二极管。点接触型二极管又可分为普通点接触型、高反向耐压点接触型、高反向电阻点接触型、高传导点接触型二极管等。

3) 按工作频率	分为高频二极管、射频二极管和低频二极管等。
4) 按功率	分为小功率二极管、中功率二极管和大功率二极管，通常认为小功率二极管的额定电流小于 1A，大功率整流管二极管的正向电流可达数千安。
5) 按安装方式	分为插装二极管和贴装二极管。
6) 按用途	分为整流、检波、限幅、恒流、混频、稳压、开关、变容、续流、变阻、磁敏二极管等。

4. 二极管排

二极管排是将两只或两只以上的二极管按一定链接封装在一个外壳内构成的。

1) 连接方式	二极管排内部电路的连接方式有共阴极（将各只二极管的负极接在一起）型、共阳极（将各只二极管的正极接在一起）型、串接型和独立引脚型等多种连接形式。
2) 外部形状 二极管排的外部形状如图 2-9 所示。	<div></div> <p>图 2-9 二极管排的典型外部形状</p>
3) 内部电路连接 二极管排的内部电路连接主要有共阳极型、单管型和共阴极型三类，如图 2-10 所示。图中，无二极管图形符号的引线为公共端（单管型除外）。	<div></div> <p>图 2-10 二极管排的内部电路</p>

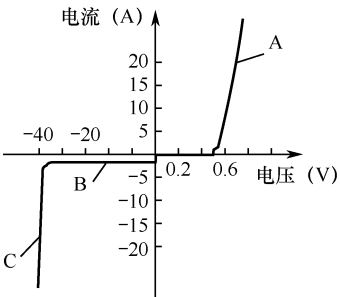
4) 常见二极管排型号

常见的三引脚二极管排(内含两只二极管)的型号有 DAN209、DAN201、DAN215、DAN208、DAP208、DA203、DA210S、DA216、DA218S 等。常见的五引脚二极管排(内含 4 只二极管)的型号有 DAN401、DAP401 等。常见七引脚二极管排(内含 6 只二极管)的型号有 DAN601、DAP601 等。常见九引脚二极管排(内含 8 只二极管)的型号主要有 DAN801、DAN803、DAP801、DAP803 等。

2.2 二极管的特性与参数

2.2.1 伏安特性

1. 伏安特性曲线

正 向 特 性	特 性 曲 线	反 向 特 性
<p>正向特性是指二极管外加正向偏置电压(正偏)时的伏安(V-I)特性。如图 2-11 中 A 段曲线(第一象限)所示。</p> <p>(1) 死区: 二极管正向特性曲线(A 段)是由两段组成。在起始段, 正向电压小于 0.6V 时, 二极管不导通, 这时的正向电流接近于零, 正向电压在 0~0.6V 范围内变化时, 正向电流几乎不变化。这段伏安(V-I)特性曲线平坦, 称为死区。</p> <p>(2) 门槛电压: 门槛电压是指二极管开始导通时的正向电压。当正向电压由零逐渐增大到门槛电压时, 二极管开始导通。导通后的正向电阻变小, 流过管子的电流急剧增大。硅二极管的门槛电压为 0.6V, 锗二极管为 0.2V。</p> <p>(3) 正向压降: 正向压降(又称二极管的正向导通压降, 简称压降), 是指二极管进入完全导通状态时两端间的电压值。二极管完全导通后, 两端间的电压基本为定值。通常情况下硅管的正向压降是 0.7V, 锗管的正向压降是 0.3V。</p>	<p>二极管的伏安特性是指二极管两端的电压与管中流过的电流间的函数关系, 通常用曲线, 即伏安(V-I)特性曲线表示, 如图 2-11 所示。</p>  <p>图 2-11 硅二极管的典型伏安特性曲线</p>	<p>反向特性是指二极管外加反向偏置电压(即反偏)时的伏安(V-I)特性, 如图 2-11 中 B、C 段曲线(第三象限)所示。</p> <p>(1) 反向电流: 反向电流是指二极管加反向偏置电压(即反偏)时流过的电流。反向电流会随着温度的升高而快速增大。</p> <p>(2) 反向饱和电流: 加在二极管两端的反向偏置电压在相当大范围内变化(低于反向击穿电压, 如 B 段曲线所示)时, 反向电流几乎不变, 此电流称为二极管的反向饱和电流。</p> <p>(3) 反向击穿: 当加在二极管两端的反向偏置电压逐渐增加到一定数值(即反向击穿电压)时, 反向电流急剧增加、直线上升, 这种现象称为二极管的反向击穿。反向击穿会导致普通二极管的损坏, 如图 2-11 中 C 段曲线所示。</p>

2. 二极管的电容效应

由于 PN 结具有结电容，所以二极管具有一定的电容效应，主要是势垒电容和扩散电容。

(1) 势垒电容	<p>势垒电容主要是指随 PN 结中多数载流子数量的变化而变化的电容。由于 PN 结两边积存着不同的电荷，当两端电压变化时会引起两边电荷数量的改变，电压越高，电荷越多，电容效应越明显。</p> <p>当加在 PN 结两边的正向电压升高时，相当于给电容充电；当正向电压降低时，相当于电容放电。当加在 PN 结两端的反向电压升高时，相当于使电容放电；反向电压降低时，相当于给电容充电。</p>
(2) 扩散电容	<p>扩散电容主要是指随 PN 结中少数载流子数量的变化而变化的电容。正向电压增加时，PN 结两边的少数载流子的浓度增加，相当于对电容充电；正向电压降低时，少数载流子浓度减少，相当于使电容放电。</p>
(3) 偏置与电容大小的关系	<p>二极管的 PN 结正向偏置时，电阻小，电容大，主要为扩散电容；反向偏置时电阻大，电容小，主要为势垒电容。</p>
(4) 电容效应	<p>电容具有“隔直通交”特性，即阻断直流、允许交流电流通过。其阻抗与交流电流频率成反比。所以当工作频率足够高时，电容的容抗就变得很小，相当于短路，交流信号可以顺利通过，所以在高频时二极管就失去了单向导电性。</p>

3. 二极管的开关特性

(1) 两种工作状态及转换	<p>二极管有导通和截止两种工作状态。导通时的阻抗很小，相当于短路；截止时阻抗很大，相当于开路。二极管开关特性就是在导通与截止两种状态转换过程中表现出来的特性。二极管的状态转换时间很短，一般情况下可以忽略不计。</p>
(2) 导通与截止条件	<p>硅二极管的导通条件是两端电压大于 0.7V；截止条件是两端电压小于 0.5V。锗二极管的导通条件是两端电压大于 0.3V；截止条件是两端电压小于 0.1V。</p>
(3) 反向恢复时间	<p>在二极管处于导通状态时，两端的电压突然从正向偏置变为反向偏置时，二极管并不能立刻截止，而是要经过一段时间后方能进入截止状态。这个由导通到截止的转换过程需要的时间称为反向恢复时间。这个时间越短，二极管的开关速度越快。</p>
(4) 开通时间	<p>二极管从截止状态转为导通状态所需的时间称为开通时间。这个时间同反向恢复时间相比是很短的，它对开关速度的影响一般可以忽略不计。</p>

2.2.2 技术参数

二极管的技术参数，由于制造材料、工艺等方面的原因，型号相同二极管的参数并不完全一致，即存在一定的分散性，所以有的参数值通常给出的是变化范围而不是一个具体数值。

1. 极限参数

(1) 最大正向电流 (I_F)	<p>最大正向电流（也称额定整流电流、额定正向工作电流、最大整流电流）是指二极管长期、连续、可靠工作时允许通过的最大正向电流值。它是根据允许温升换算出来的平均电流值。为避免过热损坏，在实用中二极管中通过的电流不允许超过其最大正向电流。</p> <p>例如，大功率整流二极管的 I_F 值可达数千安，而常用的 1N4001~4007 型二极管的 I_F 是 1A。</p>
(2)最大反向工作电压 (V_{RM})	<p>最大反向工作电压（又称最高反向电压、反向峰值电压、耐压）是指二极管在不被击穿情况下所允许承受的反向峰值工作电压。二极管的最大反向工作电压值可达上千伏。为避免二极管的损坏，在实际应用中二极管承受的反向电压不能大于最大反向工作电压。</p> <p>例如，二极管 1N4001 的最大反向工作电压为 50V；1N4007 为 1000V。</p>
(3)最大直流反向电压 (V_R)	<p>最大直流反向电压是指可以连续施加在二极管两端的直流工作电压，一般是最大反向工作电压值的一半。</p>
(4) 最高工作频率 (f_M)	<p>最高工作频率是指二极管单向导电性能开始明显变差时的交流信号频率。</p> <p>例如，点接触式二极管的最高工作频率通常在 100MHz 以上；整流二极管的最高工作频率一般不高于几千赫。</p>
(5) 最大浪涌电流 (I_{FSM})	<p>最大浪涌电流是指二极管不被损坏情况下所允许瞬间流过的最大正向电流。其数值因二极管型号而异，但远远高于其额定电流。</p>
(6) 最大功率 (P_M)	<p>二极管的功率（即消耗功率）等于二极管两端间的电压降与管中流过电流的乘积。二极管中有电流流过就会产生热量，使自身温度升高。最大功率是指保证二极管长期、稳定、可靠工作所允许消耗的功率最大值。</p>

2. 电流参数

(1) 反向电流 (I_{co})	<p>反向电流是指二极管加上规定的反向偏置电压后流过二极管的反向电流值。它的大小直接反映了二极管的单向导电性能。理想情况下这个电流的值是零，但在实际中总存在着或大或小地反向电流。该电流对工作温度比较敏感。</p>
(2) 反向饱和漏电流 (I_R)	<p>反向饱和漏电流（又称反向峰值电流）是指在二极管两端加上反向电压时流过二极管的电流。这个电流值越小，二极管的单向导电性能越好。该电流的大小与半导体材料和温度有关。在常温下，硅二极管的 I_R 为纳安（nA）级，锗二极管的 I_R 为微安（μA）级。</p>

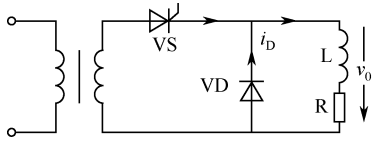
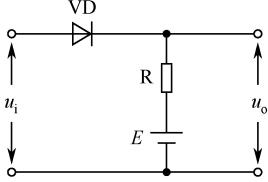
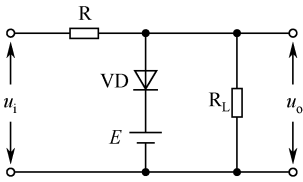
3. 极间电容

极间电容包括零偏压电容和反偏压电容。

(1) 零偏压电容	<p>零偏压电容是指二极管两端电压为零时的势垒电容和扩散电容的总和。例如，2CK15 型二极管的零偏压电容小于 5pF。</p>
(2) 反偏压电容	<p>反偏压电容是指二极管外加反向偏压时产生的电容。反偏压电容的大小与反向偏压的大小有关，反向偏压越大，反偏压电容越小；反之，反偏压电容越大。</p>

2.3 二极管的用途与检测

2.3.1 二极管的用途

1. 整流	整流就是利用二极管的单向导电性，将方向交替变化的电流变换成单一方向的脉动直流电流。在直流电源、中频电源、变频器、UPS 中都有应用，并可制成各种整流桥和半整流桥模块。
2. 检波	从经过调制的高频调幅信号中提取出调制信号的过程称为检波。二极管的单向导电性可将负半周的波形去掉，然后通过电容滤波将高频成分滤掉，把留下的低频信号通过负载输出，完成检波功能。
3. 续流 在实用电路中，经常看到二极管同电感器、继电器线圈、变压器等感性负载并联。当感性负载被断开时，为其储存的能量提供释放通道，起续流作用，同时也起保护作用。	<p>续流二极管的典型应用电路如图 2-12 所示。</p>  <p>图 2-12 续流二极管应用电路</p> <p>图中，电阻 R 视电流大小情况决定是否需要。感性负载（也称储能元件）L 在晶闸管 VS 导通时，电压为上正下负，电流方向从上向下。当 VS 关断时，感性负载中的电流突然中断，线圈中会产生很高的感应电动势，其方向是力图保持电流不变。这个感应电动势与电源电压叠加后加在 VS 两端，容易使 VS 击穿。有了续流二极管 VD，就可以将储能元件产生的感应电势短路掉，从而达到保护 VS 的目的。</p>
4. 限幅	<p>利用二极管正向导通后正向压降基本保持不变（硅管为 0.7V，锗管为 0.3V）的特点，在电路中作为限幅元件，可以把信号幅度限制在预定范围内。</p> <p>限幅电路中的二极管如串在输入、输出之间，为串联限幅电路，如图 2-13 所示。图中，u_i 为输入电压，u_o 为输出电压。</p> <p>如将二极管和负载并联，则组成并联限幅器，如图 2-14 所示。</p>   <p>图 2-13 串联限幅电路</p> <p>图 2-14 并联限幅电路</p>
5. 电子开关	开关作用就是利用二极管的开关特性，控制其导通、截止状态间的相互转换以实现电路的通、断切换，可以构成各种开关电路和逻辑电路等。

2.3.2 二极管的检测

二极管的检测比较简单。利用万用表的电阻挡测量其正反向电阻值就可以判别二极管两引脚的极性，并判定二极管的好坏。

1. 极性判断

用万用表	(1) 调零：将万用表置于 $R\times 100\Omega$ 挡或 $R\times 1k\Omega$ 挡，并将红、黑两表笔接触（即短路）进行调零。
	(2) 测电阻：两表笔分别接二极管的两个电极，测出一个电阻值；然后两表笔对调，再测出一个电阻值。阻值大（一般大于 $100k\Omega$ ）的为反向电阻，阻值小（一般大于 100Ω ）的为正向电阻。
	(3) 极性判定：在阻值大的一次测量中，黑表笔接的是二极管的负极，红表笔接的是二极管的正极。
目测	当玻璃封装二极管的标记磨掉时，可轻轻刮掉外壳上的漆层（黑色或白色），透过玻璃察看金属触针，有金属触针的引脚是正极，另一引脚为负极。

2. 工作频率判断

查表	二极管工作频率的高低可在其特性参数表中查阅。
目测	观察二极管内部的触丝来加以区分。例如，点接触型二极管属于高频管，面接触型二极管属于低频管。
测量电阻	将万用表置于 $R\times 1k\Omega$ 挡，进行电阻测量。正向电阻小于 $1k\Omega$ 的多为高频。

3. 好坏判断

用万用表 $R\times 100\Omega$ 或 $R\times 1k\Omega$ 挡测量其正反向电阻值。	正常情况下，点接触型锗二极管的正向电阻小于 $1k\Omega$ ，反向电阻应在 $100k\Omega$ 以上；硅面接触型二极管正向电阻在 $5k\Omega$ 左右，反向电阻应高于 $1000k\Omega$ 。一般说来，正向电阻越小越好，反向电阻越大越好。
电阻值异常	若测得的正向电阻为无穷大，说明二极管内部断路、损坏；若测得的反向电阻接近于零，表明二极管已击穿、短路损坏。内部断路或击穿的二极管皆不能使用。
电阻值过大或过小	当测得的正向电阻太大或反向电阻太小时，表明该二极管不宜用于检波与整流。
单向导电性	测得的正反向电阻值相差越大，二极管的单向导电性越好。
特殊情况	上述方法不适用于变容二极管、稳压管等特殊二极管的检测。

2.4 整流二极管

整流二极管是指将输入的交流电转换成直流电输出的二极管。通常认为输出电流大于 $100mA$ 的二极管为整流二极管。其结构多是面接触型。

2.4.1 基本知识

耐压与电流	整流二极管用途广泛，在不同应用场合需要承受的电压和电流相差甚大。其耐压一般在几十伏至数千伏之间。需要通过的电流从毫安级到数千安之间。所以整流二极管的型号很多，外形差别也很大。
典型结构	整流二极管中流过的电流一般较大或很大，多采用面接触型结构，金属封装。

制造材料	整流二极管主要用硅和碳化硅半导体制造。这是因为它们的击穿电压高、反向漏电流小、高温性能好。
工作频率	整流二极管的结电容较大，工作频率偏低。一般在几十千赫以下。
封装与外形	<p>管压降越大，工作时电能消耗越多，发热量也越大。大电流的整流二极管多采用螺栓型金属陶瓷管壳封装、面接触塑料封装和金属平板型封装，以利于散热。</p> <p>由于不同型号整流二极管的耐压和电流差别很大，外形也各不相同，其典型外部形状如图 2-15 所示。</p> 
散热	在实际应用中，通过二极管的平均电流一定要小于其最大平均整流电流 (I_F)，并要满足散热条件。大电流整流二极管的额定电流（即最大平均整流电流）是带有规定散热片条件下的数值，如不装散热器，必须降级使用。
最大反向漏电流	最大反向漏电流 I_R 是指整流二极管在最高反向工作电压作用下的漏电流。该电流值越小，二极管质量越好。
结温	结温是指半导体整流二极管在规定的使用条件下工作时所允许的最高温度。一旦超过这个温度，二极管就有被烧坏的可能。
产品系列	整流二极管主要为硅整流二极管。国产系列有 2CZ 系列、高压硅堆 2CLG 等；国外有 1N、RL、RU、EU、V、1SR 系列等。

图 2-15 常见整流二极管的外部形状

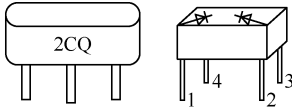

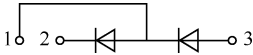
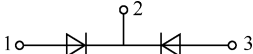
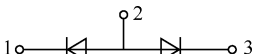
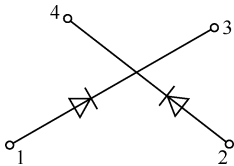
2.4.2 整流模块

1. 模块类型及特点

整流模块是将常用整流电路中的整流管及其连线封装在一个模块中制成的。

分类	单相半桥整流模块。
	单相桥式整流模块。
	三相半波整流模块。
	三相桥式整流模块。
模块优点	可以缩短连线，减少体积，提高工作可靠性。
应用	广泛应用在各种直流电源、变频器、电焊机、UPS 电源、中频电源、开关电源、仪器仪表、控制装置、家用电器等产品中。

2. 单相半桥整流模块

<div>1) 构成与外形</div> <div>单相半桥整流模块是由两只二极管组合在一起构成的，有三端和四端两种封装形式，模块的型号很多，外形也各异。常见小功率模块的早期典型外部形状及现在实物如图 2-16 所示。</div>	<div></div> <div>(a) 早期外形</div> <div></div> <div>(b) 现在实物</div> <div>图 2-16 半桥整流模块</div>
<div>2) 四种连接方式</div> <div>三端单相半桥模块内有两只二极管，两只二极管有顺向串联（即普通式）、头对头（即共阴级式）、背对背（即共阳极式）三种连接方式。如图 2-17（a）、（b）、（c）所示，四端单相半桥整流模块内部的两只二极管各自独立（即独立式），具体连接如图 2-17（d）所示。</div>	<div></div> <div>图 2-17（a）普通式（MDC）</div>
	<div></div> <div>图 2-17（b）共阴级式（MDK）</div>
	<div></div> <div>图 2-17（c）共阳极式（MDA）</div>
	<div></div> <div>图 2-17（d）独立式</div>
<div>3) 实际应用</div>	<div>在实际使用时，可用一只半桥整流模块组成全波整流电路；用两只半桥整流模块组成单相全桥整流电路。</div>

3. 单相桥式整流器模块

单相桥式整流模块是将按桥式整流电路连接的四只整流二极管及其连线集成在一起并用绝缘塑料封装成一体形成的。模块有四个引脚，其中两个引脚是直流输出端，标有“+”或“-”，另两个引脚是交流输入端，其间带有“~”标记。

整流模块内的芯片与底板间具有良好的绝缘，采用标准封装，具有良好的温度特性。大功率桥式整流模块在绝缘层外添加金属壳包封，以增强散热能力。

- 1) 形状
- (1) 常见单相桥式整流模块如图 2-18（a）所示。

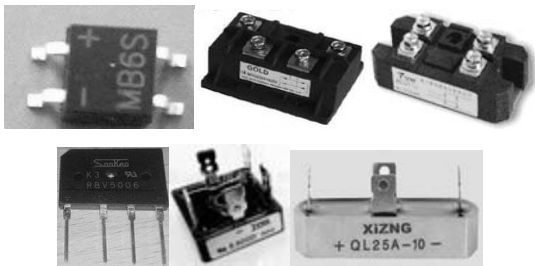


图 2-18 (a) 单相桥式整流模块

(2) 小功率单相桥式整流模块外形如图 2-18 (b) 所示。

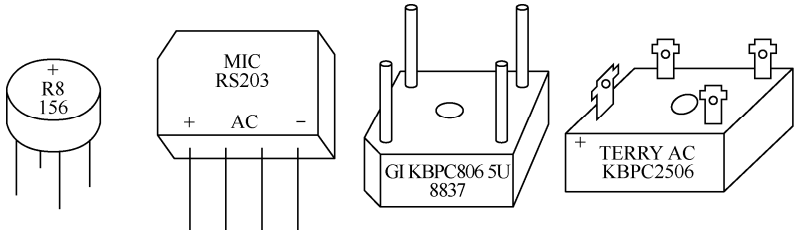


图 2-18 (b) 小功率单相桥式整流模块外形

2) 内部电路

单相桥式整流模块的内部电路连接如图 2-19 所示。

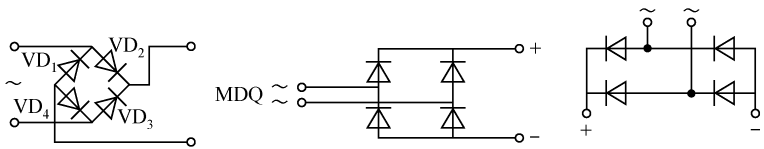


图 2-19 单相桥式整流模块的内部电路连接图

3) 图形符号

单相桥式整流模块的电路图形符号如图 2-20 所示。

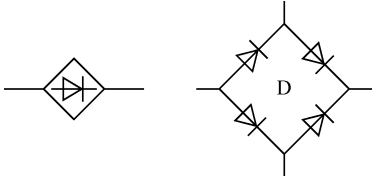


图 2-20 单相桥式整流模块的图形符号

4) 产品系列及规格

常用的国产单相全桥整流模块的主要产品系列为 QL、SQL 等。

国产单相全桥整流模块的额定电流有 0.5A、1A、1.5A、2A、2.5A、3A、5A、10A、20A 等多种规格，耐压值（最高反向电压）也有 25V、50V、100V、200V、300V、400V、500V、600V、800V、1000V 等多种。

4. 三相整流模块

三相整流模块分为三相半波整流模块和三相桥式整流模块两类。

<p>1) 三相半波整流模块内部电路</p> <p>三相半波整流模块是将按三相半波整流电路连接的三个整流二极管、滤波电容及其连线集成并封装成一体而成的。三相半波整流模块都含有输入电源的零线 N（即中性线），所以有 4 根输入线，两根直流输出线。三相半波整流模块封装着三个共阴极连接的二极管。</p>	<p>三相半波整流模块的内部电路连接（带滤波电容）如图 2-21（a）所示。图中，C 为滤波电容，其电容值可小于单相半波或全波整流电路的滤波电容。</p> <div data-bbox="698 428 993 618"></div> <p>图 2-21（a） 三相半波整流模块电路图</p>
<p>2) 三相半波整流模块</p> <p>常见三相半波整流模块如图 2-21（b）所示。</p>	<div data-bbox="776 714 921 847"></div> <p>图 2-21（b） 三相半波整流模块</p>
<p>3) 三相桥式整流模块内部电路</p> <p>三相桥式整流模块是将按桥式整流电路连接的六只整流二极管、滤波电容及其连线集成并封装为体制成的。整流模块内的芯片与底板间具有良好的电气绝缘，采用了标准封装，使模块具有很好的温度特性。同其他模块相比，三相桥式整流模块的正向电流可以更大、耐压值（最高反向电压）可以更高。</p>	<p>三相桥式整流模块的内部电路（带滤波电容）及连接如图 2-22 所示。</p> <div data-bbox="698 1037 993 1218"></div> <p>图 2-22 三相桥式整流模块内部电路图</p>
<p>4) 三相桥式整流模块</p> <p>常见三相桥式整流模块如图 2-23 所示。</p>	<div data-bbox="547 1323 1149 1494"></div> <p>图 2-23 常见三相桥式整流模块</p>
<p>5) 产品型号及规格</p>	<p>型号：MDA、MTC、MDC、MFC、MFQ、MDK、MTG、MTY、MDQ、MDS、MDX、MB、KBL、GBL、GBJ 等。</p> <p>规格：电流 25~1000A；电压 500~2500V。</p>

2.4.3 整流二极管的选用和检测

1. 选用

整流二极管一般要求电流较大，多选用平板型和面接触型的硅或碳化硅二极管。选用整流二极管时，主要应考虑的参数除最大整流电流外，还要考虑最大反向工作电压、截止频率及反向恢复时间等参数。

普通串联稳压电源电路	对截止频率和反向恢复时间要求不高，只要选择最大整流电流和最大反向工作电压符合要求的二极管即可。
开关稳压电源及脉冲整流电路	选用工作频率较高、反向恢复时间较短的整流二极管，如 RU 系列、EU 系列、V 系列、1SR 系列等，或选择快恢复二极管、肖特基整流二极管等。
变流器、相控整流、交直流电机控制、有源和无源逆变器	需要耐高压、大电流整流管，可选用螺旋型、平板型、螺栓型整流管。
大功率变流器、焊接设备、电机控制和驱动、充电设备	可选用普通平板型整流管。

2. 检测

电路板上整流二极管的检测	先将整流二极管焊开一端或全部拆下，用万用表的 $R\times 100\Omega$ 或 $R\times 1k\Omega$ 挡测量二极管两引脚间的电阻，读出阻值，然后两表笔交换再测一次。若两次测得的电阻值大的为几十兆欧、小的几百欧或更小，说明该二极管尚好，可继续使用。若两次测得的电阻值都小且几乎相等，说明该二极管已被击穿、内部短路；若测得两电阻值都非常大，说明二极管内部断路、损坏。二极管内部不管是短路还是断路，都已损坏，必须更换。
半桥整流模块的检测	半桥整流模块由两只整流二极管组成，利用万用表分别测量半桥模块内的两个二极管的正反电阻值是否正常，电阻正常，半桥模块就正常，否则必须更换。
桥式整流模块的检测	部分桥式整流模块上标注有“+”、“-”、“~”符号，其具体含义是：“+”表示整流输出电压的正极，“-”表示整流输出电压的负极；“~”表示交流电压输入端。 检测时分别测量“+”极、“-”极间的输出电阻和“~”两输入端间电阻值。如测得的正反向电阻值均为零或均为无穷大，则该模块已被击穿（即短路）或断开（即断路）而损坏；如测得的阻值正常，则模块仍能使用。
高压硅堆检测	高压硅堆内部是由多只高压整流二极管（即硅粒）串联组成。检测时，用万用表的 $R\times 10k\Omega$ 挡测量其正反向电阻值。正常的高压硅堆的正向电阻值应大于 $200k\Omega$ ，反向电阻值应接近无穷大。若测得正反向电阻均较小，表明高压硅堆已损坏，不可再用。

2.5 检波二极管

检波二极管是用于检波（也称解调）的二极管。它可以将叠加在高、中频信号上的低频信号检出来。从某种意义上讲，检波的工作过程与整流相似，只是输入信号的频率高低、电流大小不同。通常把输出电流小于 100mA 的二极管称作检波二极管。

检波二极管的输入信号频率一般为几十千赫至几百千赫的高、中频信号，整流二极管的输入多是 50Hz 的工频电流。

2.5.1 基本知识

1. 结构

检波二极管内 PN 结的 P 区和 N 区各接一条引线(即引脚),P 区的引线为正极(即阳极),N 区的引线为负极(即阴极)。

检波二极管多用锗半导体材料制成，采用点接触型结构，其典型结构如图 2-24 所示。

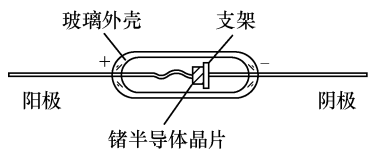


图 2-24 检波二极管结构

2. 外形

常见检波二极管的外部形状如图 2-25 所示。

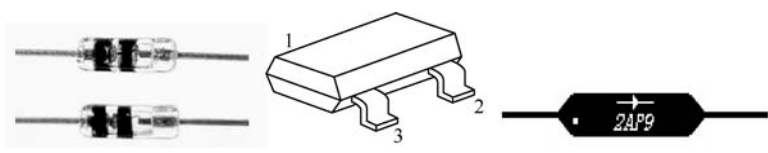


图 2-25 检波二极管

3. 检波原理

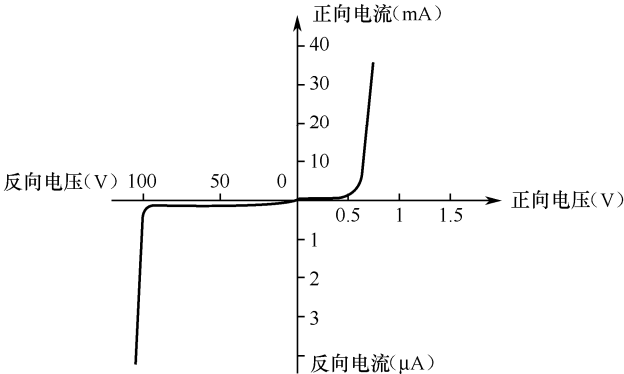
调幅信号是用一个高频信号承载一个低频信号，调幅信号的波包络就是基带低频信号。如在每个信号周期取平均值，其值恒为零。当调幅信号加到检波二极管的正极后，由于二极管的单向导电性，只有信号的正半周使二极管导通、流过，负半周时二极管截止，信号被阻止。如果使用硅管，只有幅值电压高于 0.7V 的部分能够通过二极管；如果使用锗二极管，幅值电压高于 0.3V 的部分就可以通过二极管。最后得到的调幅信号正半周为基带低频信号，实现了检波（解调）功能。

1) 检波	检波就是从调制波中提取调制信号的过程，有狭义和广义之分。对于调幅波，是从它的振幅变化中提取调制信号的过程；对于调频波，是从它的频率变化中提取调制信号的过程；对于调相波，是从它的相位变化中提取调制信号的过程。
2) 狭义检波	狭义检波（也称包络检波或幅度检波）是指从调幅波的包络中提取调制信号的过程。实际工作时先让调幅波通过检波器（通常是检波二极管），得到依调幅波包络变化的脉动电流，然后再经过低通滤波器滤去高频成分，获得反映调幅波包络的调制信号。
3) 广义检波	广义检波（也称解调）是调制的逆过程，是从调制波提取调制信号的过程。

2.5.2 特性与参数

1. 检波二极管的伏安特性

检波二极管两端的电压与流过电流的关系曲线称为伏安特性曲线。

1)正向特性	当二极管两端加上正向电压时，会产生正向电流。当正向电压小于门槛电压时，二极管呈现的电阻很大，流过的电流很小。当正向电压超过一定数值（门槛电压）时，二极管的电阻变得很小，电流会迅速上升，如图 2-26 第一象限的曲线所示。
2)特性曲线	<div></div> <p>图 2-26 检波二极管的伏安特性曲线</p>

2. 性能特点

1) 二极管的额定电流	二极管的额定电流通常小于 100mA。
2) 结构与封装	检波二极管多是锗材料、点接触结构、玻璃封装的二极管。
3) 结电容	结电容小，响应快；工作频率可达 400MHz。
4) 等效电阻	检波二极管的等效电阻很小，所以可等效为小电容，对高频信号近似短路，却阻止低频信号的通过。
5) 正向压降	检波信号通常幅度较小，所以检波二极管多用正向压降较小的锗管，如 2AP9、1N60、1SS86、1SS99、BAT54 等。
6) 反向饱和电流	检波二极管的反向饱和电流很小，平时可忽略不计。
7) 应用	用于检波、限幅、钳位、混频、开关等。

3. 主要技术参数

1) 正向电压降 (V_F)	正向电压降是指检波二极管流过额定正向电流时，在两极间产生的电压降，硅二极管为 0.7V，锗二极管为 0.3V。
2) 最高反向工作电压 (V_R)	该电压通常规定为二极管击穿电压的三分之二。
3) 击穿电压 (V_B)	击穿电压是指二极管在工作中能承受的最大反向电压，也是二极管不致反向击穿的电压极限值。
4) 零点结电容 (C)	零点结电容是指二极管在零偏置电压下的总的结电容。
5) 检波效率 (η)	检波效率是指在二极管输入端加上 10.7MHz 正弦电压时，在输出端上的直流电压与输入端的峰值电压之比。

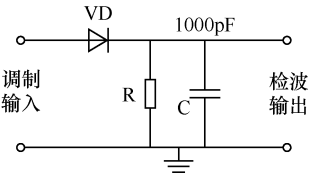
4. 常见检波二极管参数（见表 2-1）

表 2-1 常见检波二极管的主要参数

型号	正向电流 (mA)	反向电流 (μ A)	最大整流电流 (mA)	反向击穿电压 (mA)	最高反向工作电 压 (V)	反向工作电 压 (V)	最高工作频率 (MHz)
2AP1	2.5	≤ 250	16	≥ 40	20	10	150
2AP2	2.5	≤ 250	16	≥ 45	30	25	150
2AP3	7.5	≤ 250	25	≥ 45	30	25	150
2AP4	5	≤ 250	16	≥ 75	50	50	150
2AP5	2.5	≤ 250	16	≥ 110	75	75	150
2AP6	1	≤ 250	12	≥ 150	100	100	150
2AP7	5	≤ 250	12	≥ 150	100	100	150
2AP8	2	≤ 100	35	≥ 20	10	10	150
2AP9	5	≤ 200	8	≥ 20	15	10	100
2AP10	5	≤ 40	8	35	30	10	100

2.5.3 检波二极管应用电路

检波二极管广泛应用于收音机、电视、对讲机、雷达、通信等设备中的高频小信号检波。

1) 单管检波电路	<div></div> <p>图 2-27 单管检波电路</p>
-----------	---

2) 常用二
极管检波电
路

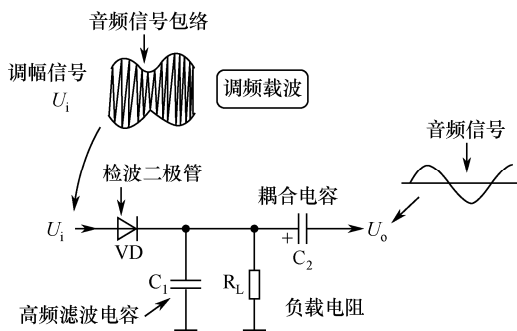


图 2-28 常用检波电路

调幅收音机天线上传的是调幅信号（见图 2-28），信号的中间部分是频率很高的载波信号，它的上下端是调幅信号的包络。包络就是需要的音频信号，上包络信号和下包络信号对称，但相位相反。收音机需要的是上包络信号。

上包络信号（调幅信号）是调幅收音机要处理、放大的信号。调幅信号的波形示意图如图 2-28 所示。图中，输入信号为 U_i ，输出信号是 U_o ，检波二极管 VD 将音频包络信号中的下半部分去掉，留下上半部分的高频载波信号。电容 C_1 将检波二极管输出信号中的高频载波信号滤除。 R_L （检波电路的负载电阻）上的压降就是检波电路的输出信号电压。耦合电容 C_2 可阻止检波电路输出信号中的直流分量通过。

3) 倍压检
波电路

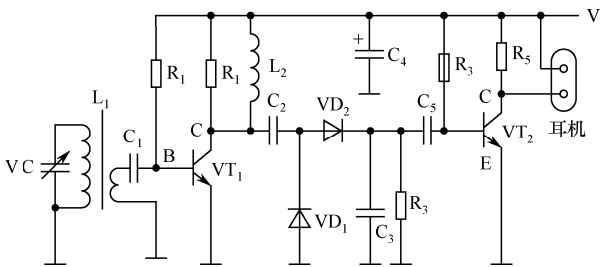


图 2-29 倍压检波电路

常见倍压检波电路如图 2-29 所示。从天线接收的信号经 C_1 耦合至 VT_1 的基极，经三极管 VT_1 高频放大后由 C_2 耦合到 VD_2 进行检波。图中， C_2 和 VD_1 、 VD_2 构成二倍压检波电路，在收音机电路中用来将调幅信号转换成音频信号。在信号的负半周，电流经 VD_1 给电容 C_2 充电；在信号的正半周，两倍的信号电压由 VD_2 检波后加在 R_3 上。电路中的 C_3 是检波输出端的滤波电容，滤除不需要的信号分量。通过这一倍压检波电路得到的音频信号电压较普通检波几乎高一倍，然后经耦合电容 C_5 加到音频放大管 VT_2 基极放大后输出。

2.6 开关二极管

开关二极管是利用二极管的单向导电性、为电路的接通、断开而设计制造的二极管，是理想的电子开关。

开关二极管不仅具有普通二极管的性能特点，还具有正向电阻小、反向电阻很大、开关速度很快、体积小、寿命长、可靠性高等优点，广泛应用于逻辑电路、开关电路、检波电路、高频和脉冲整流电路及自动控制电路等。

2.6.1 基本知识

1. 外部形状

常见开关二极管主要有插装式和贴装式，其典型外部形状如图 2-30 所示。



图 2-30 常见开关二极管外形图

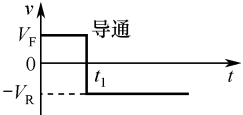
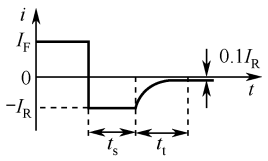
2. 分类

1)按功率	常用开关二极管可分为小功率开关二极管和大功率开关二极管。 小功率开关二极管主要有 2AK 系列、2CK 系列等。此外，小功率开关二极管还有 1N4148、1N4152、1N4151 等型号。 大功率开关二极管主要有 2CK27、2CK29 及 FR 系列开关二极管等。
2)按电流	开关二极管可以分为小电流开关二极管和大电流开关二极管。
3)按速度	开关二极管分为低速型、高速型、超高速型、低功耗型二极管。
4)按特征	开关二极管通常分为是普通型开关二极管和电压型开关二极管两种类型。电压型开关二极管又分为高压反压开关二极管、硅电压开关二极管等。

2.6.2 原理与参数

1. 基本原理

1) 基本电路 开关二极管有“导通”和“截止”两种工作状态，在导通状态下的电阻约为几十至几百欧姆；截止状态下的电阻，硅二极管一般在 $10\text{M}\Omega$ 以上，锗二极管为几十至几百千欧姆。二极管导通状态相当于开关闭合，截止状态相当于开关断开。所以开关二极管可以作为较理想的电子开关。在数字系统中，二极管基本上都工作在开关状态。		在图 2-31 所示电路中，当输入电压 V_F 加在电路后，电路中会有电流 I_F 流过，电流 I_F 的大小取决于输入电压 V_F 和负载电阻 R_L 的值。输出电压就是负载电阻 R_L 两端间的电压，其值等于输入电压减去二极管的电压降。当输入电压接近零时，二极管 VD 截止，电流 I_F 为零，负载电阻上的电压（即输出电压）也为零。
--	--	---

<p>2) 导通过程</p> <p>开通时间：开关二极管从截止（高阻状态）到导通（低阻状态）的转换时间叫开通时间，二极管的开通时间很短，对开关速度的影响很小，一般可以忽略。</p>	 <p>图 2-32 导通过程</p>	<p>图 2-31 所示电路中二极管的导通过程如图 2-32 所示，在 $0 \sim t_1$ 时间段内，输入电压为 V_F，二极管导通，电路中有电流 I_F 流过，负载 R_L 上的电压接近 V_F，因为开关二极管 VD 正向压降只有 0.7V（硅管）或 0.3V（锗管）。</p>
<p>3) 截止过程</p> <p>在 t_1 时刻，输入电压 V_F 突然降为 $-V_R$。</p>	 <p>图 2-33 截止过程</p>	<p>在理想情况下二极管立刻截止，电路中只有很小的反向电流。但实际情况是二极管并不能立刻截止，而是先由正向的 I_F 变成反向电流 I_R，电流 I_R 维持一段时间 t_s 后才开始逐渐下降，再经过一段时间 t_t 后才下降到 $0.1I_R$，这时二极管才进入反向截止状态，如图 2-33 所示。</p>
<p>4) 开关时间</p>		<p>二极管的开通时间和反向恢复时间之和称为二极管的开关时间。由于二极管的反向恢复时间远大于开通时间，所以二极管的技术参数一般只给出反向恢复时间 (t_s+t_t)。</p>

2. 技术参数

<p>1) 反向恢复时间</p>	<p>开关二极管的反向恢复时间是指开关管由正向导通到反向截止所经历的时间。通常规定从加反向偏压开始到反向电流下降到初始值的 1/10 时所用的时间为反向恢复时间。一般硅开关二极管的反向恢复时间为 3~10ns；锗开关二极管的反向恢复时间为几百纳秒。但反向恢复时间直接影响着二极管的开关速度。</p>
<p>2) 反向击穿电压</p>	<p>当开关二极管两端的反向电压超过规定值时，会使二极管击穿、损毁。这个规定的电压值就认为是二极管的反向击穿电压。</p>
<p>3) 最高反向工作电压</p>	<p>最高反向工作电压是指开关二极管正常工作时所能承受的最高反向电压，在使用时不能超过这一数值。</p>
<p>4) 正向电流</p>	<p>正向电流是指开关二极管在正向工作电压下工作时流过管子的电流。</p>
<p>5) 最大正向电流</p>	<p>最大正向电流是指二极管正向电流的最大允许值，在使用时不能超过这一数值，一旦超出，二极管就可能被烧坏。</p>

2.6.3 常用开关二极管

1. 普通开关二极管

常用普通开关二极管的国产系列是 2AK 系列的锗开关二极管。其主要参数见表 2-2。

表 2-2 普通开关二极管主要参数

参数 型号	正向电压 (V)	正向电流 (mA)	最高反向工作电压 (V)	反向击穿电压 (V)	反向恢复时间 (ns)	结电容 (pF)
2AK1~2AK6	1	100~200	10~50	30~75	300~150	≤1
2AK7~2AK10	0.45	10	30~50	50~70	150	≤1
2AK11~2AK14	0.8	250	30~50	5~70	150	≤1

2. 高速开关二极管

高速开关二极管是改进开关二极管的反向恢复特性、实现高速开关的二极管。它较普通开关二极管的反向恢复时间更短，开关速度更快，适用高频电路。

常用的国产高速开关二极管有 2CK 系列；进口高速开关二极管有 1N 系列、1S 系列、BAV 系列等。

常用的国产高速开关二极管 2CK 系列的主要参数见表 2-3。

表 2-3 高速开关二极管 2CK 系列的主要参数

参数 型号	正向压降 (V)	最高反向工作电压 (V)	反向击穿电压 (V)	正向电流 (mA)	反向电流 (mA)	零偏压电容 (pF)	反向恢复时间 (ns)
2CK9	≤1	10	15	30	≤1	≤3	≤5
2CK10	≤1	20	30	30	≤1	≤3	≤5
2CK11	≤1	30	45	30	≤1	≤3	≤5
2CK12	≤1	40	60	30	≤1	≤3	≤5
2CK20/A/B/C/D	≤0.8	15/20/30/40/50	20/30/45/60/75	50	≤1	≤3	≤3
2CK70/A/B/C/D/E	≤0.8	20/30/40/50/60	30/45/60/75/90	≥10	≤1	≤4	≤5
2CK72/A/B/C/D/E	≤0.8	20/30/40/50/60	30/45/60/75/90	≥30	≤1	≤4	≤5
2CK74/A/B/C/D/E	≤1	20/30/40/50/60	30/45/60/75/90	≥100	≤1	≤8	≤10
2CK76/A/B/C/D/E	≤1	20/30/40/50/60	30/45/60/75/90	≥200	≤1	≤8	≤10
2CK78/A/B/C/D/E	≤1	20/30/40/50/60	30/45/60/75/90	≥270	≤1	≤8	≤10

3. 高压开关二极管

高压开关二极管的反向击穿电压均在 220V 以上，零偏压电容较大，反向恢复时间较长。常用的高压开关二极管有 RLS 系列和 ISS 系列。其主要参数见表 2-4。

表 2-4 高压开关二极管主要参数

参数 型号	正向压降 (V)	最高反向工作电压 (V)	反向击穿电压 (V)	正向电流 (mA)	反向电流 (μA)	零偏压电容 (pF)	反向恢复时间 (ns)
RLS245	1.5	220	250	200	10	3	75
ISS142	1	250	300	200	0.5	10	400
ISS143	1	200	250	200	0.5	10	400
ISS144	1	150	200	200	0.5	10	400
ISS145	1	250	300	200	0.5	10	400
ISS146	1	200	250	200	0.5	10	400
ISS147	1	150	200	200	0.5	10	400

4. 超高速开关二极管

常用的超高速二极管有 ISS 系列（有引线塑封）和 RLS 系列（表面封装），超高速开关二极管的反向恢复时间虽然极短，但平均整流电流很小，不能用作大电流整流电路。

5. 低功耗开关二极管

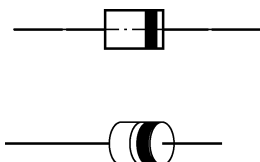
低功耗开关二极管的功耗较低，零偏压电容较小，反向恢复时间较短。常用的低功耗开关二极管有 RLS 系列（表面贴装）和 ISS 系列（有引线塑封）。常见低功耗开关二极管主要参数见表 2-5。

表 2-5 常见低功耗开关二极管的主要参数

参数 型号	正向压降 (V)	最高反向工作 电压 (V)	反向击穿电压 (V)	正向电流 (mA)	反向电流 (μ A)	零偏压电容 (pF)	反向恢复时间 (ns)
RLS139	1.2	80	90	130	0.02	5	50
RLS140	1.2	50	55	120	0.01	5	50
RLS141	1.2	35	40	110	0.01	5	50
ISS139	1.2	80	90	130	0.02	5	50
ISS140	1.2	50	55	120	0.01	5	50
ISS141	1.2	35	40	110	0.01	5	50
ISS290	1.2	80	90	130	0.02	5	50
ISS291	1.2	50	55	120	0.01	5	50
ISS292	1.2	35	40	110	0.01	5	50

6. 硅单向电压开关二极管

硅电压开关二极管分为单向电压开关二极管和双向电压开关二极管两类。

<p>1) 外形图（见图 2-34）</p> <p>硅单向电压开关二极管（又称转折二极管、反向阻断二端晶闸管、Shockley 二极管）是一种能够正向开关工作的单向开关二极管。</p>	
<p>2) 结构</p> <p>为 PNPN 四层结构、由三个 PN 结制成。</p>	<p>转折二极管的两端区域掺杂浓度较高，P 区称为阳极（A），N 区称为阴极（K）；中间的 N 区和 P 区称为基区，宽度较大。</p>
<p>3) 加正向电压（A 接电源正极，K 接电源负极）</p>	<p>转折二极管在正向电压下工作时具有双稳定状态，既有高阻、小电流的关断状态（即正向阻断状态），又有低阻、大电流的导通状态（即正向导通状态），因而具有单向开关特性。二极管的正向导通电压很低（近似等于一个 PN 结的导通电压）；由正向阻断状态转换为导通状态的转变电压称为正向转折电压。</p>
<p>4) 加反向电压（A 接电源负极，K 接正极）</p>	<p>转折二极管在反向电压下工作时，通过的电流很小，且只有一种工作状态，即反向阻断状态。但当反向电压达到击穿电压时，二极管会被击穿，电流迅速增大。如果要增大反向阻断电压，就会降低开关速度。</p>

5) 状态转换 在转折二极管进入正向饱和状态以后,如果要它再返回到正向阻断状态,就必须降低两极间电压或者改变两极间电压的极性。	当外加电压升高到正向转折电压值时,二极管由截止状态变为导通状态,由高阻态转为低阻态,呈现正向负阻开关特性。随着正向电压的增大,导致基区宽度减小,二极管电流迅速增大,与此同时电压也很快降低(即产生负阻特性),二极管就进入正向导通状态。 为保持正向导通状态所必需的最低电压和最低电流分别称为保持电压和保持电流。在实际应用中,总是希望正向转折电压越大越好,保持电压越低越好。
6)主要参数(以型号 K130 为例)	转折电压为 120~140V, 通态压降是 1.5V, 开启电流为 0.2mA, 通态电流是 1.0A, 维持电流是 100mA, 浪涌电流为 10A。
7) 主要应用	主要用于过压保护、高压输出、延时电路、电子开关、脉冲发生器、触发电路等。

2.6.4 开关二极管实用电路

1. 构成逻辑电路

利用开关二极管可以构成“与”、“或”等逻辑电路。用二极管构成的“与”、“或”电路如图 2-35 (a)、(b) 所示。

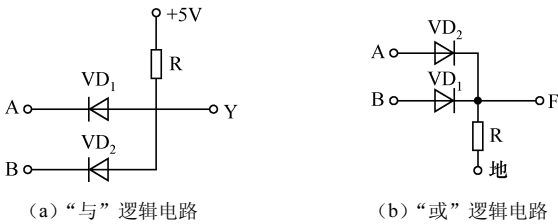


图 2-35 二极管构成的“与”、“或”电路

图 2-35 构成逻辑电路图中, A、B 是输入信号, Y、F 为输出信号。图 2-35 (a) 所示“与”电路中, 通常认为高电平是+5V, 低电平是 0V。只有两个输入 A 与 B 皆为高电平时, 输出 Y 才是高电平; 只要有一个输入是低电平, 输出就是低电平。

图 2-35 (b) 所示“或”电路中, 一般认为高电平是+5V, 低电平是 0V。当两个输入的一个 A 或 B 为高电平时, 电路的输出 F 就是高电平; 只有 A、B 两个输入都是低电平时, 输出 F 才是低电平。

2. 电子开关电路

常见二极管构成的电子开关电路如图 2-36 所示。图中, 电感 L 和电容 C₁ 并联组成 LC 并联谐振电路。C₂ 和二极管 VD 构成串联电路后与 C₁ 并联。开关二极管 VD 控制着 C₂ 的接入与断开, 以改变与电容 C₁ 并联后的总容量大小, 从而改变谐振电路谐振频率。

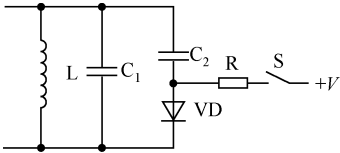


图 2-36 电子开关电路

二极管 VD 的正极通过电阻 R、开关 S 与直流电压 $+V$ 相连，构成二极管开关电路。需要 C_2 接入电路时让 VD 导通，不需要 C_2 接入电路时让 VD 截止。开关 S 用来控制工作电压 $+V$ 是否接入电路。开关 S 的开与关控制着二极管 VD 的导通与截止。

3. 模拟开关电路

利用开关二极管构成的模拟开关电路如图 2-37 所示。图中，输入、输出端串联的两个 $0.022\mu\text{F}$ 电容皆为耦合电容器。利用二极管两端的直流偏压控制其开、关。控制信号通过控制三极管 VT 的通断来改变二极管两端的偏压，进而控制二极管的通与断。

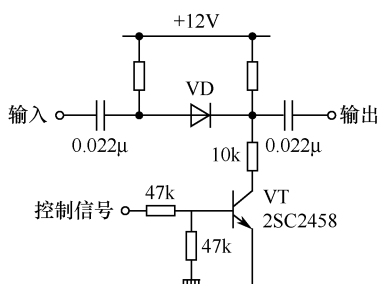


图 2-37 模拟开关电路

第3章 晶体三极管

晶体三极管（也称半导体三极管、双极型晶体管，简称三极管或 BJT）是采用一定的制造工艺，在同一块半导体材料上制作具有不同掺杂类型和浓度的三个区，形成两个 PN 结、引出三个电极的半导体器件。它最主要的特点是具有电流放大能力。

三极管一般采用塑料封装、陶瓷封装和金属封装。

3.1 结构和原理

3.1.1 基本知识

1. 常见三极管（见图 3-1）



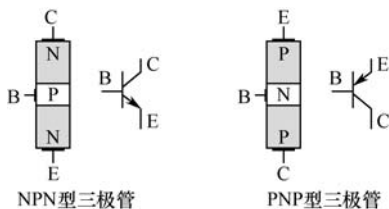
图 3-1 常见三极管

2. 文字符号

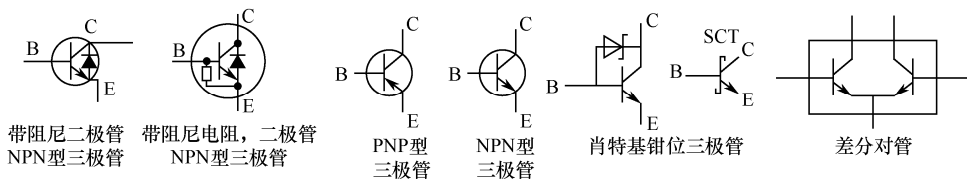
三极管的文字符号是 VT，也曾用 T、Q、BJT、BQ 等表示的。

3. 图形符号

三极管的内部结构与图形符号如图 3-2 所示。箭头朝外的是 NPN 型三极管, 箭头朝内的是 PNP 型三极管, 前者多为硅管, 后者多为锗管。箭头的方向就是电流流动的方向。图中, B 为基极, C 为集电极, E 为发射极。



(a) NPN 和 PNP 三极管的结构及国标图形符号



(b) 其他图形符号

图 3-2 三极管结构和图形符号

4. 引脚排列

三极管的封装形式多种多样，大小不一，引脚排列也不尽相同。但外形、大小一样的，引脚排列顺序也多相同。常见三极管的引脚分布如图 3-3 所示。

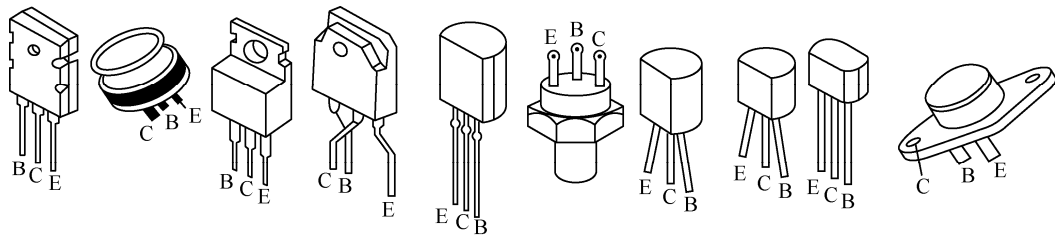


图 3-3 三极管外部形状及引脚分布

5. 三极管的结构

1) 结构类型

三极管主要有 NPN 和 PNP 两种结构。NPN 型硅三极管的结构如图 3-4 (a) 所示。图中，位于中间的 P 区为基区，基区很薄、掺杂浓度很低；位于上层的 N 区是发射区，结面积小、掺杂浓度很高；位于下层的 N 区是集电区，结面积大；虽然发射区和集电区是同种类型的半导体，但两个区的掺杂浓度明显不同，发射区的掺杂浓度远高于集电区，而集电区的面积则远大于发射区。

NPN 型三极管结构示意图如图 3-4 (b) 所示。

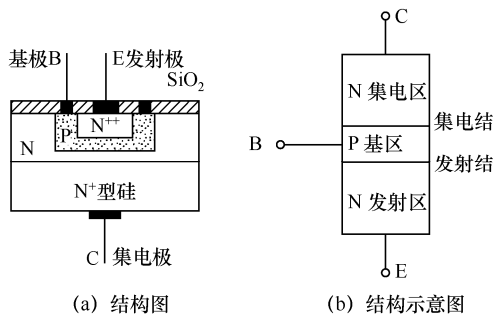


图 3-4 NPN 型三极管的结构

PNP 型三极管的结构与 NPN 型相似。其中间层为 N 区，上下两层分别为集电区和发射区；三个区的引出线依次是基极、集电极和发射极。

2) 结构特点

三极管不是两个 PN 结的简单组合，而是两个 PN 结共用一个极薄的 P 区（指 NPN 型三极管）或 N 区（指 PNP 型三极管）作为基区，通过基区把两个 PN 结有机地结合成统一的整体。彼此间存在着相互联系和相互影响，使三极管具有完全不同于两个单独 PN 结的特性。

发射区与基区之间形成的 PN 结称为发射结，集电区与基区之间形成的 PN 结称为集电结。三条引线（即电极）分别与三个区相连，发射极 E 与发射区相连接，基极 B 与基区相连接，集电极 C 和集电区相连接。

6. PNP 型与 NPN 型三极管的区别

PNP 型三极管	NPN 型三极管
图形符号中箭头朝内	图形符号中箭头朝外
基极电流的方向是向外流出	基极电流的方向是向内流入
三极管中电流由发射极流入	三极管中电流由发射极流出
三极管中电流由集电极流出	三极管中电流由集电极流入
一般认为 PNP 型管为锗管	一般认为 NPN 型管为硅管

7. 三极管的分类

晶体三极管的种类很多，分类方法也有多种。

1) 按频率	三极管按特征频率分为超高频管、高频管、中频管和低频管。低频三极管的特征频率一般低于或等于 3MHz，中频三极管的特征频率高于 3MHz、等于或低于 30MHz，高频三极管的特征频率高于 30MHz、等于或低于 500MHz，超高频三极管（也称微波三极管）的特征频率高于 500MHz。
2) 按功率	三极管按功率分为小功率管、中功率管和大功率管。通常将最大允许耗散功率 P_{cm} 小于 1W 的三极管称为小功率三极管；将 P_{cm} 等于或大于 1W、小于 5W 的三极管被称为中功率三极管；将 P_{cm} 等于或大于 5W 的三极管称为大功率三极管。
3) 按结构	三极管按结构分为 PNP 型三极管和 NPN 型三极管。
4) 按材料	按制造材料通常分为硅三极管和锗三极管等。
5) 按制造工艺	按制作工艺可分为平面型三极管、合金型三极管、扩散型三极管等。
6) 按封装材料	按封装材料可分为金属封装三极管、玻璃封装三极管、陶瓷封装三极管、塑料封装三极管、薄膜三极管等。
7) 按功能和用途	按功能和用途可分为放大管、光电管、开关管、高反压管、达林顿管、带阻尼三极管、数字三极管等。
8) 按安装方式	三极管根据安装方式主要分为插装三极管和贴装三极管。

3.1.2 三极管的电流放大原理

由于 PN 结的组合方式不同，三极管有 NPN 和 PNP 两种结构形式，形成 NPN 型或 PNP 型两类三极管。在实际电路中两者除电源极性不同外，工作原理基本相似。

1. NPN 型三极管的放大原理

三极管（NPN 型）电流放大原理示意图如图 3-5 所示。在外加电源的作用下，三极管发射区的大量自由电子在电场力的作用下向基区扩散，形成发射极电流 I_e ，运动到基区的自由电子一小部分与基区的空穴复合，形成较小的基极电流 I_b ，大部分自由电子在集电结反向偏置电压的作用下向集电区移动，形成集电极电流 I_c 。

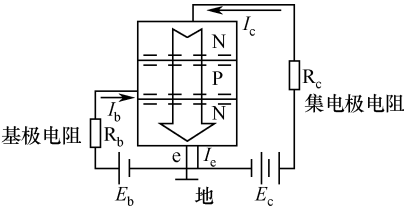


图 3-5 三极管（NPN 型）电流放大原理示意图

三个电流的关系是： $I_e=I_b+I_c$ 。

其中，基极电流 I_b 很小，集电极电流 I_c 较大，显示出电流的放大作用。一般情况下 I_c 与 I_b 的关系可表示为： $\beta=I_c/I_b$ ，即 $I_c=\beta I_b$ 。

式中 β 称为电流放大系数（或电流增益、电流放大倍数）。

三极管是一种电流放大器件，在实际使用中常常利用三极管的电流放大特性，通过集电极电阻转变为电压放大功能。

2. 电流放大系数 β

1) 取值范围	如果单纯考虑三极管的放大作用，希望 β 值越大越好。但 β 值越大，漏电流也越大；漏电流过大，会影响放大电路的正常工作，所以并不是 β 越大越好。一般情况下硅管的 β 值为 40~150，锗管的 β 值为 40~80。
2) β 不是常数	在实际应用中，三极管的电流放大系数 β 值不是固定不变的，它会随着集电极电流 I_c 的变化而变化。一般说来，当 I_c 值在微安级时或接近集电极最大允许电流 I_{cm} 时， β 值都比较小；当 I_c 值在正常范围时，小功率管的 β 值都比较大；大功率管的 β 值相对较小。合适的工作电流可以获得最佳放大效果。
3) β 值与工作频率的关系	三极管在一定频率范围内工作时， β 值基本是一个常数，即不随频率的变化而变化。但当工作频率升高并超过某一数值后， β 值就会明显减小。
4) β 值与集电极最大允许电流 (I_{cm}) 的关系	通常把 β 值降低到最大值一半左右时的集电极电流规定为集电极最大允许电流 I_{cm} 。

3. 温度对性能的影响

三极管的性能多与温度有关，温度对锗管的影响比硅管要大；其中三个参数受温度影响最大。

1) 电流放大系数 (β)	三极管的 β 值随温度的升高而增大，一般温度每升高 1℃, β 值会增加 0.5%~1%。在 I_b 相同的情况下，集电极电流 I_c 会随温度的升高而增大。
2) 反向饱和电流 (I_{ceo})	反向饱和电流（又称穿透电流、漏电流）是由少数载流子漂移运动形成的。随着温度的上升， I_{ceo} 会急剧增加。通常温度每升高 10℃，反向饱和电流就增大约一倍。
3) 发射结电压 (U_{be})	通常情况下，温度每上升 1℃， U_{be} 将下降 2~2.5mV。

3.1.3 主要特性

1. 输入特性及特性曲线

三极管的输入特性是指当集电-发射极电压 U_{ce} 为特定常数时，基极电流 I_b 与基极-发射极电压 U_{be} 之间的函数关系。

对于硅管，当 U_{ce} 超过 1V、并保持 U_{be} 不变，基极电流 I_b 也就基本不变。也就是说，当 U_{ce} 超过 1V 后，只要 U_{be} 不变化，其输入特性曲线基本上是重合的，即曲线与 U_{ce} 的大小基本无关，如图 3-6 所示。所以，对于小功率管可以近似地用 $U_{ce} \geq 1V$ 时的一条特性曲线代表三极管的输入特性曲线。

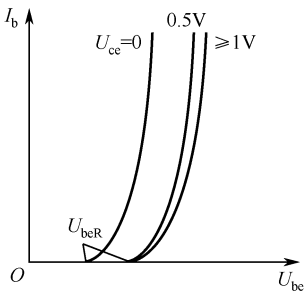


图 3-6 三极管的输入特性曲线

1) 死区	在三极管输入特性的起始段（即 $U_{be} < U_{beR}$ ， U_{beR} 为死区电压）为死区。只有当 U_{be} 大于死区电压时，三极管才会出现基极电流 I_b 。通常硅管的死区电压约为 0.5V，锗管约为 0.1V。在正常工作情况下，NPN 型硅管的发射结电压 U_{be} 为 0.6~0.7V；PNP 型锗管的发射结电压 U_{be} 为 -0.2~-0.3V。当 $U_{be} > U_{beR}$ 时， I_b 随 U_{be} 增加而增加。
2) 集电极与发射极间短路（即 $U_{ce}=0V$ ）	集电极与发射极短路后，发射结与集电结并联。此时， I_b 与 U_{be} 呈指数关系，如图中 $U_{ce}=0$ 曲线所示。
3) U_{ce} 增大	当 U_{ce} 过零后继续增大时，特性曲线将右移。要获得同样大小的 I_b ，就必须加大 U_{be} ，使发射区向基区注入更多的电子。
4) 输入电阻	三极管的输入电阻 r_b 为三极管的基区电阻，对于低频小功率管， r_b 约为 300Ω。

2. 输出特性

1) 特性曲线 三极管的输出特性是描述基极电流 I_b 一定时，集电极电流 I_c 与集电-发射极电压 U_{ce} 之间的关系，用曲线表示。 I_b 的值不同，得出的曲线也不同。所以三极管的输出特性是一组曲线，如图 3-7 所示。	
---	--

图 3-7 三极管的输出特性曲线

<p>2) 特性区划分</p> <p>三极管的输出特性通常分为截止区、放大区和饱和区,如图 3-8 所示。</p>	<div data-bbox="579 154 948 472"></div> <p>图 3-8 三极管的特性区域划分</p> <p>截止区和饱和区是三极管工作在开关状态时的工作区域。三极管导通时, 工作点落在饱和区; 三极管截止时, 工作点落在截止区。</p>
<p>(1) 截止区。</p> <p>在实际中, NPN 硅管在 $U_{be} < 0.5V$ 时已开始截止, 但是为了使三极管可靠截止, 通常使 $U_{be} \leq 0V$, 此时发射结和集电结均处于反向偏置状态。</p>	<p>图中, $I_b = 0$ 的曲线以下的区域称为截止区。在此区, 基极-发射极电压 $U_{be} < U_{beR}$ (截止电压, 即死区电压); 基极电流 $I_b \approx 0$; 集电集仍有微小电流通过, 这个电流 (即 I_{cco}) 称为穿透电流。</p> <p>常温下硅管的穿透电流 (I_{cco}) 约为几微安, 锗管约为几十微安至几百微安。它与集电极反向电流 I_{cbo} 的关系是: $I_{cco} = (1 + \beta) I_{cbo}$。</p> <p>常温下, 硅管的集电极反向电流 (I_{cbo}) 小于 $1\mu A$, 锗管的集电极反向电流约为 $10\mu A$。对于锗管, 温度每升高 $12^\circ C$, I_{cbo} 数值约增大一倍; 对于硅管, 温度每升高 $8^\circ C$, I_{cbo} 数值约增大一倍。硅管的 I_{cbo} 随温度的变化比锗管大, 但由于硅管的 I_{cbo} 值本身比锗管小很多, 所以总体上说硅管受温度的影响比锗管要小。</p>
<p>(2) 放大区。</p> <p>放大区也称线性区。</p>	<p>三极管工作在放大状态时, 其工作点一定在放大区。NPN 三极管的发射结处于正偏 (即 $U_{be} > 0$)、集电结处于反偏 (即 $U_{bc} < 0$) 是三极管工作在放大区的必要条件。</p> <p>放大区位于输出特性曲线的近似水平区段。在放大区, 三极管的集电极电流 I_c 随基极电流 I_b 的变化而变化, 两者呈线性关系。</p>
<p>(3) 饱和区。</p>	<p>当发射结和集电结均处于正偏状态时, I_c 基本上不随 I_b 而变化, 失去了放大功能。输出特性曲线的陡直部分是饱和区。在此区, 基极电流 I_b 的变化对集电极电流 I_c 的影响很小。当 $U_{ce} = U_{be}$ 时为临界饱和状态。在饱和区, $U_{ce} < U_{be}$。</p>

3. 三种工作状态

1) 截止状态	当加在三极管发射结的电压小于 PN 结的导通电压时, 基极电流为零, 集电极电流和发射极电流都接近于零, 集电极和发射极之间相当于断开状态。在这种情况下, 三极管处于截止状态。
2) 放大状态	当接入电源, 使三极管的发射结正向偏置、集电结反向偏置时, 基极电流对集电极电流起着控制作用, 三极管工作在放大状态。此时三极管的工作点落在放大区, 具有电流放大作用; 其电流放大系数 $\beta = \Delta I_c / \Delta I_b$ 。

3) 饱和导通状态	当三极管发射结电压大于 PN 结的导通电压、基极电流增大到一定程度时，集电极电流不再随着基极电流的增大而增大，只是在某一定值附近变动。这时三极管失去电流放大作用，集电极与发射极之间的电压很小，两者之间相当于开关的导通，三极管的这种工作状态称为饱和导通状态。
-----------	--

4. 三极管工作状态的分析和判断

在图 3-9 所示电路中，三极管工作状态的分析和判断步骤如下。

1) 电路原理图 图中，三极管的基极接入微安表和偏置电阻，偏置电阻由固定电阻 R_b ($100\text{k}\Omega$) 和电位器 R_p 串联组成；集电极接入毫安表和负载电阻 (300Ω)；工作电源 E 的电压为 6V 。	
2) 截止区	调节 R_p 增大阻值，当 R_p 与 R_b 的大到一定数值后，发射结电压 U_{be} 小于管子的死区电压（硅管约 0.5V ，锗管约 0.1V ）。此时 be 结处于截止状态， $I_b=0$ ，所以 $I_c=0$ ，三极管工作在截止区。
3) 放大区	如果三极管的电流放大系数 $\beta=100$ ，电位器电阻 $R_p=200\text{k}\Omega$ 。那么 $i_b=6\text{V}/(200\text{k}\Omega+100\text{k}\Omega)=0.02\text{mA}$ ； $I_c=\beta I_b=2\text{mA}$ 。 如果 $R_p=0$ 时，那么， $I_b=6\text{V}/100\text{k}\Omega=0.06\text{mA}$ ； $I_c=\beta I_b=6\text{mA}$ 。 以上两种状态电流变化规律都符合 $I_c=\beta I_b$ ，这种情况下三极管工作在放大区。
4) 饱和区	当 $R_p=0$ ， $R_b=1\text{k}\Omega$ ，此时， $I_b=6\text{V}/1\text{k}\Omega=6\text{mA}$ 。如按 $I_c=\beta I_b$ 计算， I_c 应等于 600mA 。实际上，由于图中 300Ω 限流电阻 R_c 的存在， $I_c=(6\text{V}/300\Omega)\approx 20\text{mA}$ 。在这种情况下， $I_c\neq\beta I_b$ ，而且 I_c 不再受 I_b 的控制。此时的三极管工作在饱和区。

3.1.4 特性参数

1. 电流放大系数 (β)

1) 共射极电流放大系数 电流放大系数（也称电流放大倍数）是用来表示三极管放大能力的参数。它分为直流电流放大系数和交流电流放大系数。	(1) 共射极直流电流放大系数 (h_{fe})	在静态（即无变化信号输入）时，共射极连接三极管的集电极输出的直流电流 I_c 与基极输入的直流电流 I_b 的比值，即 $h_{fe}=I_c/I_b$ 。
	(2) 共射极交流电流放大系数 (β)	交流电流放大系数（也称动态电流放大系数） β 是指三极管采用共射极接法时，集电极输出电流的变化量 Δi_c 与基极输入电流的变化量 Δi_b 的比值，即 $\beta=\Delta i_c/\Delta i_b$ 。 三极管的 β 值一般在 $10\sim 200$ 之间，如果 β 太小，电流放大作用不明显；如果 β 太大，性能又往往不稳定。

	(3) 放大系数 h_{fe} 和 β 的关系	两者既有区别又联系紧密，在低频时两个参数值基本一致，在高频时有所差异，但在实际中往往不特意区分，习惯用 β 表示三极管的电流放大系数。									
2) 放大系数的表示 (1) 用色点表示 有的三极管用色点表示其放大系数，通常色点标注在管壳上，颜色与放大系数的对应关系见表 3-1。	表 3-1 三极管的放大系数与色点的对应关系										
	型号	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑
	小功率管	7~15	15~25	25~40	40~55	55~80	80~120	120~180	180~270	270~400	400 以上
	3DD51~73	10~20	20~30	30~40	40 以上						
	3DD203, 208	30~40			40~50	50~70	70~100	100~140	140~200	200 以上	
说明：3CD 系列、3DD151~3DD172、3DD253~3DD269、开关管与小功率管相同。											
(2) 放大系数的字母表示	有些三极管的型号后面用字母表示 β 值的大小，但缺乏统一标准，每个型号中所用字母表示的 β 值也不太一样。例如，2SC1815 型三极管，其型号后面的字母所表示的 β 值是：0 表示 70~140、Y 表示 120~240、GR 表示 200~400、BL 表示 350~700。如三极管型号是 2SC1815-0，则表示该管的放大系数是 70~140。 又如 2SC2500 型三极管，其型号后面的字母 A、B、C、D 分别表示其放大系数为 140~240、200~330、300~450、420~600。										
3) 共基极电流放大系数	(1) 共基极直流电流放大系数 (h_{fb})	共基极直流电流放大系数 (h_{fb}) 是在静态（即无变化信号输入）时，集电极输出的直流电流 I_c 与发射极输入的直流电流 I_e 的比值，即 $h_{fb}=I_c/I_e$ 。									
	(2) 共基极交流电流放大系数 (α)	共基极交流电流放大系数 α 是指采用共基极接法时，集电极电流的变化量 Δi_c 与发射极电流的变化量 Δi_e 的比值，即 $\alpha=\Delta i_c/\Delta i_e$ 。因为 $\Delta i_c<\Delta i_e$ ，所以 $\alpha<1$ 。高频三极管的 $\alpha>0.9$ 就可以使用。 h_{fb} 和 α 的值相近，通常习惯用 α 表示共基极三极管的电流放大系数。									
	(3) α 与 β 的关系	表达式为： $\alpha=\beta/(1+\beta)$ ， $\beta=\alpha/(1-\alpha)$ 。									

2. 反向电流

三极管的反向电流包括其集电-基极之间的反向饱和电流 I_{cbo} 、集电-发射极之间的反向击穿电流 I_{ceo} 和发射-基极间的反向电流 I_{ebo} 。

1) 集电-基极反向饱和电流 (I_{cbo})	反向饱和电流是指发射极开路 ($I_e=0$) 时，集电-基极间加上规定的反向电压 U_{cb} 后，流过集电极的反向电流，它在一定温度下是个常数。 性能良好三极管的 I_{cbo} 很小。小功率锗管的 I_{cbo} 约为 1~10 μ A，大功率锗管的 I_{cbo} 可达几毫安；而硅管的 I_{cbo} 非常小，是毫微安级。
------------------------------	---

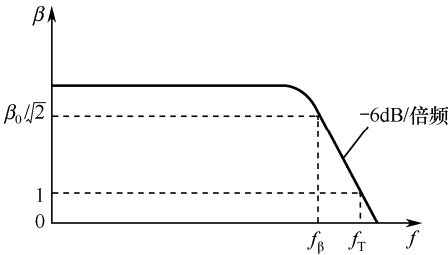
2) 集电-发射极反向电流 (I_{ceo})	<p>集电-发射极反向电流 I_{ceo} (又称穿透电流、漏电流) 是指基极开路 ($I_b=0$) 时, 集电极和发射极之间加上规定反向电压 U_{ce} 时的集电极反向电流。此电流值越小, 三极管的性能越好。</p> <p>I_{ceo} 大约是 I_{cbo} 的 β 倍, 即 $I_{ceo} = (1+\beta) I_{cbo}$。</p> <p>$I_{cbo}$ 和 I_{ceo} 受温度影响极大, 它们是衡量三极管热稳定性的重要参数, 其值越小, 性能越稳定, 小功率锗管的 I_{ceo} 比硅管大。</p>
3) 发射-基极反向电流 (I_{cbo})	<p>发射-基极反向电流 I_{cbo} 是指集电极开路时, 在发射极与基极之间加上规定的反向电压时发射极的电流。实际上它是发射结的反向饱和电流。</p>

3. 反向击穿电压 (BU_{ceo} 与 BU_{cbo})

在实际使用时, 三极管的反向工作电压应为反向击穿电压的 $1/2\sim 1/3$ 或更小, 以保证管子安全可靠地工作。

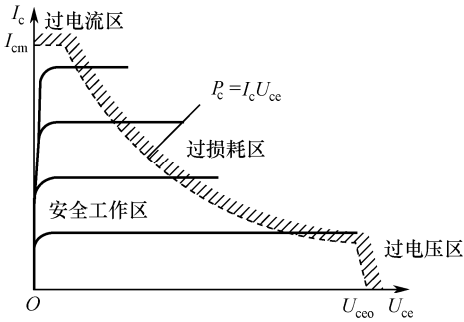
1) 基极开路	BU_{ceo} 是指基极开路时, 集电极与发射极间的反向击穿电压。
2) 发射极开路	BU_{cbo} 是指发射极开路时, 集电极与基极间的反向击穿电压。一般情况下, 同一个管子的 $BU_{cbo} = (0.5\sim 0.8) BU_{ceo}$ 。

4. 频率特性及参数

1) 频率特性	
<p>三极管的频率特性曲线如图 3-10 所示。图中 β_0 为实际放大系数。</p> <p>三极管的交流电流放大系数与工作频率有关。工作频率过高, 放大能力会明显减弱甚至失去放大作用。频率特性参数主要包括截止频率 f_β 和特征频率 f_T。</p>	
2) 频率特性参数	
<p>(1) 截止频率 (f_β、f_a)</p> <p>f_a 反映了三极管共基极连接时的频率限制。根据 f_a 的大小可将三极管划分为低频管和高频管。国标规定 $f_a < 3\text{MHz}$ 的为低频管, $f_a > 3\text{MHz}$ 的为高频管。</p>	<p>当三极管的工作频率超过某一定值后继续升高时, β (或 α) 值会持续下降, 当 β (或 α) 值下降到低频 (1000Hz) 放大系数 0.707 倍时的工作频率, 就是共发射极 (或共基极) 连接的截止频率 f_β (或 f_a)。</p> <p>f_β 和 f_a 都是表明管子频率特性的重要参数。f_a 与 f_β 的物理意义是相同的, 只是放大电路连接方式不同。同一只三极管的 f_β 值远小于 f_a 的值。f_a 和 f_β 的关系为</p> <div>$f_\beta = (1-\alpha_0) f_a$$f_a = (1+\beta_0) f_\beta$</div> <p>由此可知, 共发射极电路的截止频率比共基极电路低得多。所以, 高频放大和振荡电路多采用共基极连接。</p>

<p>(2) 特征频率 (f_T)</p> <p>晶体管的工作频率超过截止频率 f_β 时, 其电流放大系数 β 值将随着频率的升高而继续下降。当 β 值降为 1 时三极管的工作频率规定为特征频率, 用 f_T 表示。</p>	<p>特征频率又称为增益-带宽乘积, 即 $f_T=\beta f_o$; 式中, f_o 为三极管实际工作频率, β 为高频电流放大系数。</p> <p>当三极管的工作频率为其特征频率 f_T 时, 电流放大系数 $\beta=1$, 三极管失去了放大能力。所以在实际应用时, 应保证所选三极管的特征频率 f_T 比实际工作频率高出 3~5 倍。</p> <p>由于 f_T 是反映三极管的高频放大性能的重要参数, 所以通常将特征频率 f_T 小于或等于 3MHz 的三极管称为低频管; f_T 大于或等于 30MHz 的晶体管称为高频管; 将 f_T 大于 3MHz、小于 30MHz 的三极管称为中频管; 将 f_T 大于 75MHz 的三极管称为特高频管。</p>
<p>(3) 最高振荡频率 (f_m)</p>	<p>最高振荡频率 f_m 是指三极管的功率增益降为 1 时所对应的工作频率。当工作频率大于 f_m 时, 三极管就失去功率放大功能; 只有工作频率低于 f_m 时, 三极管方具有功率放大能力。高频三极管的最高振荡频率低于共基极连接时的截止频率 f_a。</p>

5. 极限参数

<p>1) 极限参数分区</p>	 <p>图 3-11 三极管的极限参数分区</p>
<p>2) 集电极最大允许耗散功率 (P_{cm})</p>	<p>集电极最大允许耗散功率 P_{cm} 是指保证三极管正常工作情况下集电极所允许消耗的最大功率。三极管的实际耗散功率等于集电极与发射极之间的电压与电流的乘积, 即 $P_c=U_{ce}\times I_c$。</p> <p>耗散功率与三极管的最高允许结温和集电极最大电流有密切关系。三极管在使用时, 其实际功耗不允许超过 P_{cm} 值; 否则, 三极管就工作在过损耗区, 如图 3-11 所示。这会造成三极管因过载而损坏。</p> <p>P_{cm} 与三极管的散热条件密切相关, 增加散热片或改善散热条件可提高 P_{cm} 值。</p>
<p>3) 集电极最大电流 (I_{cm})</p>	<p>集电极最大电流 I_{cm} 是指当集电极电流 I_c 增加到某一数值、导致 β 值下降到额定值的 2/3 或 1/2 时的 I_c 值。它是晶体管集电极所允许通过的最大电流。当三极管的集电极电流 I_c 超过 I_{cm} 时, 三极管的 β 值等参数将发生明显变化, 虽然三极管不致损坏, 但性能会受到显著影响。</p> <p>对于小功率管来说, 通常规定在 $U_{ce}=1V$ 时, 利用公式 $P_{cm}=I_c\times U_{cm}$ 求出的集电极电流 I_c 就是 I_{cm}。</p>

6. 三极管的其他参数符号及含意

C_c	集电极电容	P_i	输入功率
C_j	结电容	hoe	共发射极小信号开路输出导纳
C_{ce}	发射极接地输出电容	P_{osc}	振荡功率
C_i	输入电容	rie	发射极接地，交流输出短路时的输入电阻
C_{ib}	共基极输入电容	P_{tot}	总耗散功率
C_{ie}	共发射极输入电容	P_{omax}	最大输出功率
C_o	输出电容	P_n	噪声功率
C_{ob}	共基极输出电容	R_{BB}	双基极三极管的基极间电阻
C_{oe}	共发射极输出电容	R_{th}	热阻
CTV	电压温度系数	$R_z(ru)$	动态电阻
C_{TC}	电容温度系数	T_{jm}	最大允许结温
U_{ces}	发射极接地，基极对地短路，集电极-发射极之间在规定条件下的最高耐压	T_s	结温
P_o	输出功率	U_n	噪声电压
U_{cex}	发射极接地，基极与发射极之间加规定的偏压，集电极与发射极之间在规定条件下的最高耐压	t_{fr}	正向恢复时间

7. 常用三极管主要参数

1) 大功率三极管（见表 3-2）

表 3-2 常见电视机用大功率三极管主要参数

型 号	P_{CM} (W)	I_{CM} (A)	BU_{EBO} (V)	BU_{CEO} (V)	I_{CEO} (mA)	h_{fe}	外形	替代型号
3DD850	50	3	≥ 5	700	≤ 1.5	≥ 8	TO-3	2SD850
3DD820		5		600				2SD820
3DD905		8		650				2SD905
3DD1455		5		800				2SD1455
3DD869		3.5		600				2SD869
3DD870		5						2SD870
3DD871		6						2SD871
3DD1942		3		800				2SC1942
3DD951	65	5		1500	≤ 3			2SD951
3DD852	70			800				2SD852
3DD821	50	6		600	≤ 1.5			2SD821
3DD822		7						2SD822
BU207		5						700
BU208								
BU208D	60							
BU204	36	2.5		600				≤ 3
BU205				700				
2SD897A	50	1.5		150	≤ 1.5	≥ 10		
2SC1358		4.5		500				

续表

型 号	P_{CM} (W)	I_{CM} (A)	BU_{EBO} (V)	BU_{CEO} (V)	I_{CEO} (mA)	h_{re}	外形	替代型号
2SC1325A	80	6		600	1.5	≥ 10	TO-3	—
3DD200	30	3		100	0.5	≥ 30	F-2	2SD251
3DD201	50	8		150		≥ 40		2SD45
3DD202A		3		500	0.7	7~30		F-1
3DD202B				600				
3DD203	15	1		60	0.5	≥ 50	F-2	2SD152
3DD204	30	3		75			F-1	BLY48A
3DD205	15	1.5		150		≥ 40		2SC783
3DD206	25			400		≥ 30		2SD656

2) 贴装三极管（见表 3-3）

表 3-3 常见贴装三极管主要参数

参数 型号	极限参数				直流参数									f_t (MHz)
	P_C (mV)	I_C (mA)	BUcbo (V)	BUceo (V)	I_{cbo}		U_{ce} (sat)			h_{fe}				
					(UA)	U_{cb} (V)	(V)	I_c (mA)	I_b (mA)	MIN	MAX	U_{ce} (mA)	I_c (mA)	
S9012 A1505	200	-500	-40	-20	-0.1	-25	-0.6	-500	-50	100	300	-1	-50	80
S9013 C3876	200	500	40	20	0.1	25	0.6	500	50	100	300	1	50	80
S9014 S1623	200	100	50	45	0.05	30	0.3	100	5	100	600	5	1	150
S9015 T812	200	-100	-50	-45	-0.05	-30	-0.3	-100	-5	100	600	-5	-1	150
T5401	350	-600	-160	-150	-0.05	-120	-0.2	-10	-1	80	240	-5	-10	100
TA92	200	-500	-300	-300	-0.25	-200	-0.5	-20	-2	80	220	10	-10	50
TA42	200	500	300	300	0.1	200	0.5	20	2	80	220	10	10	50
T3904	200	200	60	40	0.1	30	0.2	10	1	100	300	1	10	300
T3906	200	-200	-40	-40	-0.1	-25	-0.25	-10	-1	100	300	-1	-10	250
PN2222A	200	500	75	40	0.1	60	0.3	150	15	100	300	10	150	300
PN2907A	200	-500	-60	-60	-0.1	-50	-0.4	-150	-15	100	300	-10	-150	200
C1815 BC1623	200	150	60	50	0.1	50	0.25	100	10	120	600	6	2	80
A1015 T812	200	-150	-60	-50	-0.1	-50	-0.25	-100	-10	120	600	6	2	80

3) 高频小功率三极管（见表 3-4）

表 3-4 常见 3CG 高频小功率三极管主要参数

型 号	P_{CM} (mW)	I_{CM} (mA)	BU_{MBO} (V)	BU_{CEO} (V)	I_{CBO} (μA)	I_{CEO} (μA)	h_{fe}	f_t (MHz)	
3CG100A	100	30	4	15	0.1	0.1	≥ 25	100	
3CG100B				25					
3CG100C				40					
3CG101A				15					
3CG101B				25					
3CG101C				35					
3CG21A	300	50		20	0.5	1			
3CG21B				40					
3CG21C				50					
3CG21D				70					
3CG21E				80					
3CG21F				90					
3CG21G				100					
3CG110A				15	0.1	0.1			
3CG110B				30					
3CG110C				45					
3CG111A				15					
3CG111B				30					
3CG111C				45					
3CG112A				15				100	
3CG112B				30					
3CG112C				45					
3CG160A				60					

4）常用其他三极管（见表 3-5）

表 3-5 常用其他三极管主要参数

型 号	材 料	最高电压	最大电流	最大功率	频 率
2SC109	SI-NPN	50V	0.6A	0.6W	—
2SC288A	SI-NPN	35V	20mA	0.15W	—
2SC373	SI-NPN	35V	0.1A	0.2W	—
2SC380TM	SI-NPN	30V	50mA	0.3W	100MHz
2SC388A	SI-NPN	25V	50mA	0.3W	300MHz
2SC394	SI-NPN	25V	0.1A	—	200MHz
2SC454	SI-NPN	30V	0.1A	—	230MHz
2SC458	SI-NPN	30V	0.1A	—	230MHz
2SC460	SI-NPN	30V	0.1A	0.2W	230MHz
2SC461	SI-NPN	30V	0.1A	0.2W	230MHz
2SC509	SI-NPN	35V	0.5A	0.6W	60MHz
2SC535	SI-NPN	20V	20mA	0.1W	—
2SC536	SI-NPN	40V	0.1A	—	180MHz
2SC620	SI-NPN	50V	0.2A	0.25W	—

3.2 低频放大器

3.2.1 静态工作点

在三极管电路中，静态工作点就是输入信号为零时，电路中的电流、电压的数值，它可用三极管特性曲线上一个确定的点来表示，这个点习惯上称为静态工作点（Q）。所谓“静态”就是放大电路没有输入信号时的工作状态。为使静态工作点不变，要求电路的电源电压 U_{cc} 、偏置电阻 R_b 、负载电阻 R_c 不变，电路中各参数也都是不变的。

1. 作用

(1) 由静态工作点可以确定放大电路中各点电压和各支路电流的静态值。
(2) 选取合适的静态工作点可以保证在被放大的交流信号输入电路时，不论是正半周还是负半周都能保证三极管工作在放大状态，使输入信号能够在不失真的情况下被放大。

2. 位置

静态工作点是三极管的直流负载线与三极管的某条输出特性曲线的交点。它随 I_b 的变化而沿直流负载线上下移动。

在三极管的输出特性曲线族上，直流负载线是管压降 U_{ce} 数值点、集电极电流 I_c 数值点间的直接连线。此时， $U_{ce}=U_{cc}-R_cI_c$ ； $I_c=(U_{cc}-U_{ce})/R_c$ 。式中， U_{cc} 是电源电压， U_{ce} 为三极管的管压降。

3. 参数

管压降 (U_{ceq})	电路无输入信号时，三极管的集电极与发射极间的电压值。
基极电流 (I_{bq})	在电路的输入信号为零（即直流电源 U_{cc} 单独作用）时的三极管基极电流值。
集电极电流 (I_{cq})	在电路的基极电流为 I_{bq} 时所得到的集电极电流 I_c 。有时可用发射极电流 I_e 代替。
基极-发射极电压 (U_{beq})	在电路的基极电流为 I_{bq} 、管压降为 U_{beq} 时的基极与发射极间的电压值。

4. 电路图

有时直接将静态工作点 Q 点记作 I_{bq} 、 I_{cq} （或 I_{eq} ）、 U_{beq} 、 U_{ceq} ，如图 3-12 所示。图中标注参数 I_b 、 I_c （或 I_e ）、 U_{be} 、 U_{ce} 在静态工作点的值分别是 I_{bq} 、 I_{cq} （或 I_{eq} ）、 U_{beq} 、 U_{ceq} 。

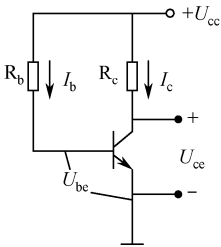


图 3-12 确定静态工作点的几个参数

5. 对输出波形的影响

截止失真	若输入信号的幅值较小，为降低能耗，一般会把 Q 点（即静态工作点）选得较低。当 Q 点过低时，输入信号容易使三极管进入截止状态，导致输出信号底部产生失真。这种因静态工作点过低、致使管子截止产生的失真称为截止失真。
饱和失真	若选择的 Q 点过高，当输入信号进来时，三极管会进入饱和区，致使输出信号波形产生顶部失真。这种因静态工作点过高而产生的顶部失真称为饱和失真。
最大不失真输出电压	正常情况下，为使三极管放大电路不失真地放大交流输入信号，Q 点应该选在负载线的中央位置，以获得最大不失真输出电压幅值。

3.2.2 单管小信号放大器

放大器是一种三端电路，有输入端、输出端和共用端。共用端一般为接地端，如果这个共用端与发射极相接称为共射极放大电路；共用端与集电极相接的称为共集极放大电路；共用端与基极相接的称为共基极放大电路。所以三极管单管放大电路有共射极、共集电极、共基极三种接法，其组成原则及分析方法基本相同。

1. 共射极放大电路

共射极基本放大电路如图 3-13 所示。图中， u_i 是直流电压源， E_1 、 E_2 分别集电极、基极电源， u_o 为输出电压。三极管的发射极是电路输入回路 with 输出回路的公共端，且公共端接地。

共射极基本放大电路的电压放大作用是利用三极管的电流放大能力、依靠集电极电阻 R_c ，将电流的变化转换成电压的变化来实现的。

共射极放大电路具有较大的电流和电压放大系数，输出电阻较大，但频带较窄。通常用作低频放大电路。

2. 共集电极放大电路

共集电极基本放大电路如图 3-14 所示。图中， u_i 是直流电压源， E_1 、 E_2 分别集电极、基极电源， u_o 为输出电压。三极管的集电极是输入和输出回路的公共端，且公共端接地。

电路中，输出电压 u_o 通过发射极电阻 R_c 全部反馈到电路的输入端，所以电路为深度负反馈，反馈系数 $F=1$ 。

共集电极放大电路的输入电阻大、输出电阻小，具有从信号源索取的电流小和负载能力强的特点。常用于多级放大电路的输入级和输出级，也可用作前后级电路的连接电路，起缓冲作用。

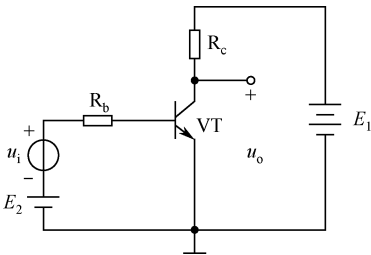


图 3-13 共射极基本放大电路

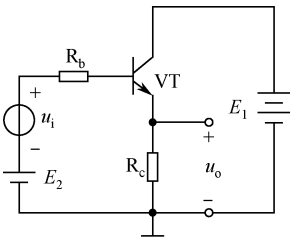
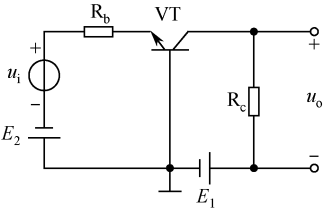


图 3-14 共集电极基本放大电路

3. 共基极放大电路

共基极基本放大电路如图 3-15 所示。图中， u_i 是直流电压源， E_1 、 E_2 分别集电极、基极电源， u_o 为输出电压。三极管的基极是输入回路和输出回路的公共端，且公共端接地。

共基极放大电路虽无电流放大作用，但具有频带宽等特点，常用于无线电通信等领域。



4. 三种电路性能比较

图 3-15 共基极基本放大电路

为保证放大器的线性放大作用，三极管不仅要有一个合适的静态工作点，而且工作点必须稳定。在表 3-6 中， R_b 为偏置电阻， R_c 为负载电阻； E_o 是工作电源；电路中的电容 C_1 、 C_2 是输入、输出信号耦合电容，具有隔直作用； U_i 为输入电压信号， U_o 为输出电压。

当三极管的 β 、 I_{cbo} 、 U_{be} 等参数因温度、老化等因素发生变化时，必然引起集电极电流 I_c 的变化，造成工作点的移动。一般通过三极管的偏置电路或电压负反馈来减弱及消除参数变化带来的影响，稳定静态工作点。三种放大电路的偏置电路及主要参数对比见表 3-6。

表 3-6 三种放大器的偏置电路及主要参数对比

电路类型	电路结构	电压放大系数	电流放大系数	输入电阻	输出电阻
共射极电路		10~100 大	10~1000 大	100Ω~50kΩ 中	10kΩ~500kΩ 中
共集电极电路		0.9~0.999 小	10~1000 大	50MΩ 左右 大	1~100Ω 小
共基极电路		100~10000 (实用) 大	0.9~0.999 小	10~500Ω 左右 小	500kΩ~5MΩ 大

3.2.3 两级耦合放大器

1. RC 耦合的两级放大器

1) 电路原理图

两级阻容耦合放大器如图 3-16 所示。图中，三极管 VT_1 、 VT_2 各构成一级放大器，两级

间通过耦合电容 C_2 相连； C_1 是输入耦合电容； C_3 、 C_4 为旁路电容； C_5 为输出耦合电容； R_L 为负载电阻； u_i 为输入电压信号； u_o 为输出电压信号。

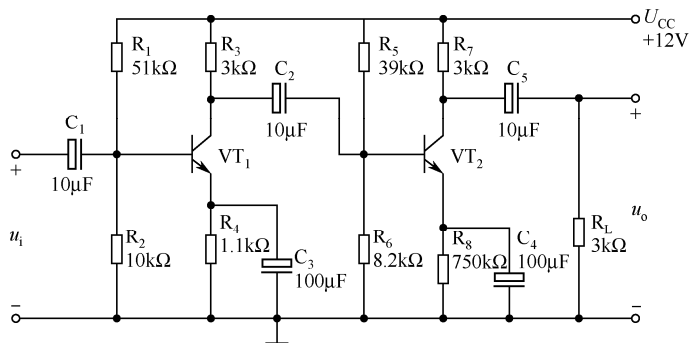


图 3-16 阻容耦合放大电路

2) 工作原理

(1) 耦合电容 C_1 、 C_2 、 C_5 有隔直作用，两级放大器的静态工作点完全独立，可以分别进行调试。

(2) 对于交流信号，两级放大器之间有着密切的联系，前一级的输出信号就是后一级的输入信号，后级的输入阻抗也就是前级的负载。

(3) 两级放大电路的总电压放大系数等于各级电压放大系数的乘积，即 $A_u=A_{u1} \times A_{u2}$ 。其中， A_u 是放大器的电压放大系数， A_{u1} 是第一级 (VT_1) 的电压放大系数， A_{u2} 是第二级 (VT_2) 的电压放大系数。

3) 适用范围

通常，阻容耦合方式主要用在信号频率较高、输出功率较大的电路中。

2. 直接耦合的两单管放大器

由两单管构成的直接耦合放大器如图 3-17 所示。图中， u_i 为输入电压信号， u_o 为输出电压信号；放大器、信号源、负载之间皆直接采用导线或电阻相连接。

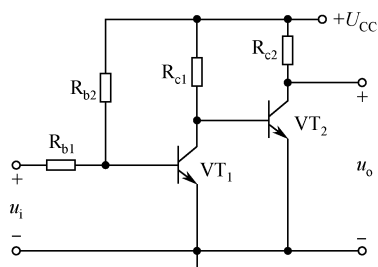


图 3-17 直接耦合的两单管放大电路

(1) 三极管 VT_1 的集电极与 VT_2 基极直接相连，前级的输出即是后级的输入。电路既可以放大缓慢变化的信号，也可以放大直流信号，具有良好的低频特性。

(2) 电路的总电压放大系数等于两级电压放大系数的乘积，即 $A_u=A_{u1} \times A_{u2}$ 。其中， A_u 是放大器的电压放大系数， A_{u1} 是第一级 (VT_1) 的电压放大系数， A_{u2} 是第二级 (VT_2) 的电压放大系数。

(3) 前级放大器与后级放大器的静态工作点相互影响，给电路的分析、设计和调试带来

了一些麻烦和困难。

(4) 电路中只有三极管和电阻, 没有大电容、电感器件, 便于集成。

直接耦合方式适用于交流信号、缓慢变化信号和直流信号的放大电路, 在集成电路中广为应用。

3.3 差分放大器

差分放大器(又称差动放大器、差动放大电路, 简称差放)是一种将两个输入端电压的差值以固定增益放大的电子放大器, 其输出信号是随着两端输入信号之差变动的。差分放大器不仅可消除电路的零点漂移, 还能有效抑制共模干扰。通常被用作功率放大器(简称功放)和发射极耦合逻辑电路(即 ECL)的输入级。

3.3.1 零点漂移及补偿

1. 零点漂移

在直接耦合放大电路中, 即使在输入端短路(即输入为零)后, 输出端仍会有忽快忽慢、忽高忽低、变化缓慢的输出电压。这种输出电压的示意图如图 3-18 所示, 这种输出电压的波动现象就是零点漂移。直接耦合放大器的级数越多、放大系数越大, 漂移现象越严重。

2. 示意图(见图 3-18)

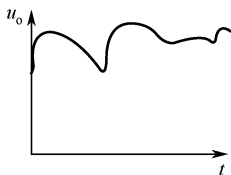


图 3-18 输出电压随时间漂移

3. 产生原因

- (1) 环境温度发生变化导致电路中三极管和阻容元件等参数发生变化。
- (2) 电源电压出现波动。
- (3) 三极管、电阻、电容等器件因老化所导致的自身参数变化。
- (4) 电路中各元件参数受内外电磁干扰等而产生变化。

4. 危害

零点漂移可以在直接耦合放大器中逐级向下传递, 在输出端形成较大的漂移电压, 使放大器性能变差, 甚至造成放大电路不能正常工作。

5. 减小或消除办法

- (1) 采用高质量的稳压电源, 尽量减小电源电压的波动。
- (2) 使用经过老化处理和筛选的元器件, 以保障元件参数的基本稳定。
- (3) 在电路中引入直流负反馈, 减弱漂移的影响。

- (4) 采用温度补偿的方法，利用热敏元件来减弱或消除因温度变化引起的零点漂移。
- (5) 采用必要的抗干扰措施，减弱或消除内外电磁干扰的影响。
- (6) 采用特性尽量相近或相同的三极管或差分对管，构成差分放大器，使零点漂漂相互抵消。

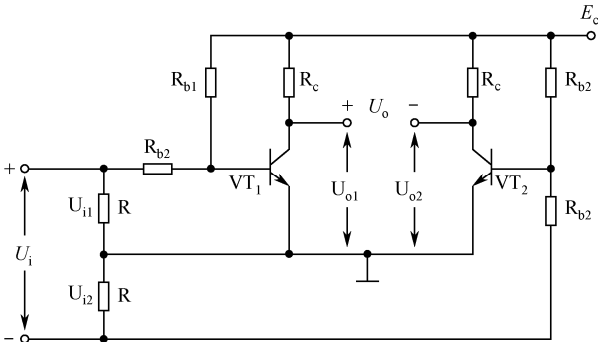
3.3.2 差分放大器的构成及原理

1. 基本差分放大器

<p>1) 四种连接方式</p> <p>基本差分放大器由两个元件参数相同的共射极放大电路组成，有两个输入端和两个输出端，共有四种连接方式。</p>	<p>(1) 双端输入双端输出。</p> <p>(2) 单端输入双端输出。</p> <p>(3) 双端输入单端输出。</p> <p>(4) 单端输入单端输出。</p>
<p>2) 输入方式</p>	<p>(1) 双端输入：在双端输入情况下，输入信号同时加到两个输入端。</p> <p>(2) 单端输入：在单端输入情况下，输入信号加在一个输入端与地之间，另一个输入端接地。</p>
<p>3) 输出方式</p>	<p>(1) 双端输出：在双端输出时，输出信号为两输出端信号的差值。</p> <p>(2) 单端输出：单端输出时，输出信号取自一个输出端和地之间，另一输出端无信号引出。</p>
<p>4) 输入信号</p>	<p>(1) 差模输入信号：两信号大小相等、极性相反。</p> <p>(2) 共模输入信号：两信号大小相等、极性相同。</p> <p>(3) 当两个输入信号的大小不等、相位不同时，输入信号可以看成是由差模信号分量和共模信号分量两部分组成。</p>
<p>5) 基本结构</p> <div data-bbox="54 1190 469 1532"></div>	<p>基本差动放大器使用$+E_c$和$-E_c$两个电源，如图 3-19 所示。</p> <p>图中，三极管 VT_1 和 VT_2 特性要尽量相同（最好为对管），两组电阻数值也相同。差动电路的两个输入端分接同一个给定信号 U_i 的高低端，分别经基极电阻 R_1、R_2 接入。电路的输出信号是两个输入信号差值放大后的数值，即 $U_o=U_{o1}-U_{o2}$。</p>
<p>6) 桥形电路结构</p> <p>差分放大器实际上是一个桥形电路，两个集电极电阻 R_c 和两个三极管分别是桥路的四个桥臂，输出电压 U_o 从电桥的对角线上取出。</p>	<p>没有输入信号时，因为 $R_{c1}=R_{c2}$，两管 VT_1 和 VT_2 特性又相同，所以电桥是平衡的，输出是零。正是这种桥路结构，使差分放大器能有效抑制静态漂移。</p>

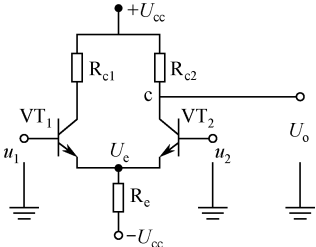
图 3-19 基本差分放大器

2. 工作原理

1) 电路原理图	<p>由于组成差分放大器的两个三极管特性及配用电阻参数相同,两管的静态工作点也相同。具体电路如图 3-20 所示。</p> <p>图中,三极管 VT₁ 管的给定信号为 $U_i/2$、VT₂ 的给定信号为 $-U_i/2$。</p> 
2) 当给定信号 $U_i=0$ 时	<p>由于差分放大器的对称性,两管中流过的电流相等,两管的集电极电位 U_{o1} 和 U_{o2} 也相等,所以放大器的输出电压为零(即 $U_o=U_{o1}-U_{o2}=0$)。</p>
3) 减弱或消除温度变化的影响	<p>当环境温度上升时,将导致两管中流过的电流增加,两集电极电阻 R_c 上的压降也都增大,两管集电极电位均下降。由于它们处于同一温度环境且特性对称,两管中流过的电流和集电极电位变化量均相等,其输出电压 U_o 仍为零,从而减弱或消除了温度变化带来的影响。</p>
4) 抑制零点漂移	<p>为了克服电路不完全对称引起的零点漂移及减小每个三极管电极对地的漂移电压,电路中可以增加发射极公共电阻 R_e(见图 3-19),即两管的公共发射极经电阻 R_e 接地。由温度变化造成两个三极管输出电压的漂移都得到一定程度的抑制,R_e 的阻值越大,抑制零漂的作用就越强。但在集电极电压(E_c)一定的情况下,过大的 R_e 会使管压降 U_{ce} 变小和集电极电流减小,导致电压放大系数下降。所以 R_e 的阻值不能过大,一般几十欧到几百欧为宜。</p>
5) 放大作用	<p>(1) 当差分电路的两个输入端输入差模信号(幅值相等、极性相反)时,其放大能力等同于单管共射放大电路。差分放大器是以牺牲一个管子放大功能的代价换取了对零漂的抑制能力。</p> <p>(2) 差分电路在双端输出时的差模电压增益与单管共发射极放大器相同;单端输出时的差模电压增益为双端输出时的一半。</p>
6) 抑制共模干扰	<p>(1) 共模干扰(也称纵模干扰、不对称干扰或接地干扰):是指电源对大地、中线对大地的电位差。在三相电路中,共模干扰存在于任何一相与大地之间。在差动放大器中,无论是电源电压波动或者是温度变化都会使两管的集电极电流和集电极电位发生相同的变化,相当于在两输入端加入共模信号。由于电路完全对称,对共模输入信号无放大作用,即有效抑制了共模信号。</p> <p>(2) 差模干扰:是指两信号线上产生的幅值相等、极性相反的干扰信号。</p>

7) 共模抑制比	如果差分放大器的差模增益用 A_d 表示，共模增益用 A_c 表示，则其共模抑制比（CMRR）定义为：
	$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$
	通常用共模抑制比（CMRR）衡量差分放大器消除共模信号的能力。当共模增益 $A_c \rightarrow 0$ 时， $CMRR \rightarrow \infty$ 。发射极电阻 R_e 越大， A_c 就越小，共模抑制比就越大；为减小共模放大系数，通常是增大发射极电阻 R_e 。使用内阻大的恒流源来代替 R_e ，效果会更好。

3. 单端输出的差分放大器

1) 电路原理图 在实际应用中，差分放大器有时为单端输出（或不平衡输出）方式，具体如图 3-21 所示。 图中， u_1 、 u_2 为两个输入信号， U_o 为输出信号，由正（ U_{cc} ）负（ $-U_{cc}$ ）两个电源供电。单端输出信号为差动输出信号幅度的一半，且不能抑制共模输入信号。	
2) 抑制共模信号	当加大 R_e 阻值，随着发射极电流 I_e 的上升， U_e 也升高，这对 VT ₁ 和 VT ₂ 产生负反馈，使其增益减小， U_o 也相应减小，从而可以增强对共模信号的抑制作用。
3) 放大差模信号	当差模信号输入时，由于 $u_1 = -u_2$ ， I_{c1} 增加而 I_{c2} 减少，总电流 $I_e = I_{c1} + I_{c2}$ 却不变，因此 U_e 也不变。电路将差分信号放大，却不会对 VT ₁ 及 VT ₂ 产生负反馈，也不会对差模信号有抑制作用。 由此可知，单端输出差分放大器也可有效抑制零点漂移和共模干扰，可以有效放大差模信号。
4) 差分对管 差分对管（也称孪生对管、一体化差分对管）是由两只性能参数相同的三极管封装在一起构成的电子器件。	差分对管可以很方便地构成性能优良的差分放大器，一般用在音频放大器或仪器、仪表中做差分输入放大管。 常用的差分对管有 3DG06A~3DG06D、3CSG3、2SA798、2SC1583、2SA979 等。

3.4 反馈放大电路

3.4.1 反馈放大电路的构成

1. 反馈的基本概念

反馈就是将放大电路的输出量的一部分或全部通过反馈回路（或反馈网络）回送到放大

电路的输入端、并同给定信号一起参与电路的调整与控制，以改善放大电路的性能。引入反馈电路后的放大电路称为反馈放大电路或反馈放大器。

2. 反馈的极性

根据反馈信号对放大电路性能影响的效果，可将反馈分为正反馈和负反馈两种。引入的反馈信号与外加给定信号综合后作为放大电路的有效输入信号（也称净输入信号）。反馈信号如果削弱了给定信号的称为负反馈；引入的反馈信号使给定信号增强的称为正反馈。放大电路使用较多的是负反馈；振荡电路中多使用正反馈。

3. 反馈方式与效果

反馈量的性质和方式决定反馈效果。

电压负反馈	电压负反馈是将与输出电压成正比的负反馈量与给定的电压信号综合后作为放大电路的输入信号。其反馈效果能使输出电压更稳定，输出电阻减小。
电流负反馈	电流负反馈是将与输出电流成正比的负反馈量与给定的电流信号综合后作为放大电路的输入信号。其反馈效果能使输出电流更稳定，输出电阻增加。
串联负反馈	串联负反馈是指将反馈量以串联形式接入输入回路的反馈方式，串联负反馈可增大输入电阻。
并联负反馈	并联负反馈是指将反馈量以并联形式接入输入回路的反馈方式，并联负反馈可减小输入电阻。
常用负反馈形式	常用的负反馈形式多是上述反馈方式的组合，如电流并联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈、电压串联负反馈等。

4. 反馈作用的特点

正反馈	能提高电路的放大系数、增强输出信号，但加剧了放大电路性能的不稳定性，主要用于振荡电路。
负反馈	降低电路的放大系数、减弱输出信号，却换来了放大电路性能（如增益、线性、频率响应、阶跃响应等）的改善；同时缓解了由制造及环境所造成的器件参数偏差对放大器性能的影响。

3.4.2 负反馈放大电路分析

1. 框图表示

负反馈放大电路的框图如图 3-22 所示。图中， X_g 为给定信号， X_o 为输出信号， X_f 为负反馈信号， $X_i=X_g-X_f$ 为输入信号。

框图表明，负反馈放大电路是由开环增益为 A 的放大电路、反馈系数 $B \leq 1$ 的负反馈网络、取样环节和综合（或比较）环节四个基本部分构成的一个闭环系统。所以常称反馈放大电路为闭环放大电路；无反馈的放大电路为开环放大电路。图中综合和取样环节都是通过反馈网络与基本放大电路的特定连接方式实现的。

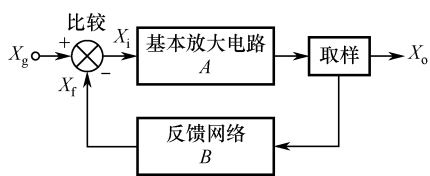


图 3-22 负反馈放大电路框图

2. 闭环增益

在图 3-22 中，当反馈未接入时，给定信号 X_g 作为输入信号 X_i 直接加在放大电路的输入端，相应的输出信号是 $X_o = AX_i = AX_g$ 。

当接入一个反馈系数为 B 的反馈网络时，输出信号与输入信号和反馈信号的差值直接相关。这个差值就是加在放大电路输入端的输入信号。

其关系式是：

输入信号： $X_i = X_g - BX_o$ ；输出信号是： $X_o = A (X_g - BX_o)$ 。

整理得： $X_o (1 + BA) = AX_g$

由此可知反馈放大器的闭环增益 A_b 为： $A_b = X_o / X_g = A / (1 + BA)$ 。

(1) 当 $A \gg 1$ 时， $A_b \approx 1/B$ 。这种状态通常称为深度负反馈。在这种情况下，负反馈放大电路的增益（即放大系数，也称闭环增益） A_b 可以通过改变反馈系数 B 来确定。

(2) 当 $BA = -1$ 时， $A_b = \infty$ 。此时，负反馈放大电路的增益为无穷大，可导致电路产生振荡，不能稳定工作。

3. 反馈极性判断

不同极性的反馈对放大电路性能的影响完全不同，在分析具体反馈电路时，首先必须正确判断电路中反馈的极性。

(1) 忽略电路中所有电抗元件（电感、电容等）的影响。
(2) 用正负号（或箭头）表示电路中各点电压的瞬时极性（或瞬时变化）。
(3) 以给定电压 U_g 为准，看 U_g 和反馈信号综合后形成的有效输入信号是增大还是减小来判定反馈的极性。使有效输入信号减弱的反馈为负反馈，反之为正反馈。

4. 电压反馈还是电流反馈的判别

将输出端短路后，输出电压为零，这时的反馈信号如消失，则为电压反馈；如反馈信号仍然存在，则为电流反馈。

5. 串联反馈还是并联反馈的判别

(1) 串联反馈。

当反馈信号与给定信号综合后，输入信号若等于两电压信号的相加，则为串联反馈。

(2) 并联反馈。

当反馈信号与给定信号综合后，输入信号若是两电流信号的相加，则为并联反馈。

3.4.3 射极跟随器

射极跟随器（又称射极输出器，简称跟随器）是信号从基极输入、从发射极输出的电流放大器。由于输出信号紧随输入信号的变化而变化，且相位相同、数值也几乎相等，所以被称为射极跟随器。

1. 电路构成

射极跟随器的电路原理图如图 3-23 所示。

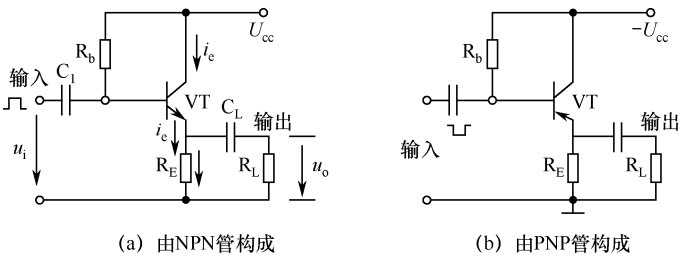


图 3-23 射极跟随器

图中电路的连接属于电压串联负反馈放大器。

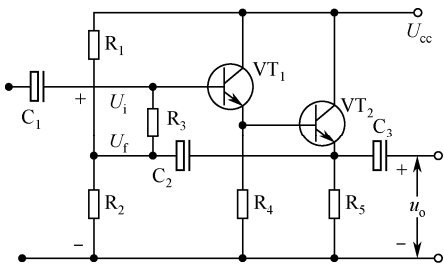
2. 功能特点

- (1) 射极跟随器属于深度负反馈电路，输出电压全部反馈到输入端。动态电压放大系数略低于 1，工作稳定。
- (2) 输入电阻大，基极电流小；对信号源或前级放大器来说，是很轻的负载。
- (3) 输出电阻小，一般在几十到几百欧之间。负载能力强，可以驱动阻抗比较小的负载。
- (4) 在多级放大器的两级之间加入一级射极跟随器，容易实现阻抗匹配，能起到缓冲作用，减少了前后级之间的相互影响。
- (5) 输出电压能够在较大范围内跟随输入电压作线性变化，且两者相位相同，数值相近。
- (6) 具有电流放大作用，以很小的输入电流得到很大的输出电流，即 $i_e = (1 + \beta) i_b$ 。

3. 主要参数

(1) 输入电阻 (R_i)	射极跟随器的输入电阻为： $R_i = r_{be} + (1 + \beta) R_e$ 。式中， r_{be} 是发射结电阻， R_e 是发射极电阻， β 为三极管的放大系数。
2) 输出电阻 (R_o)	射极跟随器的输出电阻小，一般在几十至几百欧之间。
3) 电压放大 系数 (A_v)	射极跟随器的电压放大系数小于 1，但接近于 1。
4) 电压跟随 范围	电压跟随范围是指输出电压 u_o 跟随输入电压 u_i 作线性变化的区间。当 u_i 超过一定范围时， u_o 便不能跟随 u_i 作线性变化，即 u_o 波形产生了失真。为了使输出电压 u_o 的正负半周对称，并充分利用电压跟随范围，三极管的静态工作点应选在负载线的中间位置。

4. 自举式跟随器

<div>1) 电路原理图</div> <div>自举式跟随器的典型电路如图 3-24 所示。图中，VT_1、VT_2 等组成两级射极跟随电路，C_1、C_3 为耦合电容，R_3、C_2 组成反馈电路。</div>	<div></div> <div>图 3-24 自举式跟随器</div>
<div>2) 自举</div>	<div>图中，电阻 R_3 的下端电位随上端电位的升高而升高，故称为自举。当外加信号经 C_1 加在 VT_1 的输入端时，可抬高 R_3 上端电位，经两级射极跟随，输出电压 u_o 升高，升高后的输出电压经 C_2 耦合至 R_3 的下端，使下端电位升高。</div> <div>自举的作用使 R_3 两端的交流压降为零。</div>
<div>3) 工作原理</div>	<div>电路的电源及各元器件确定后，三极管的静态工作点已确定；VT_1、VT_2 两管的基极-发射极间的电压降也确定。VT_1 的有效输入信号是由 C_1 耦合来的输入信号、偏置电阻 R_1、R_2 决定的给定信号和电容 C_2 耦合来的反馈信号综合而成。如果 VT_1 和 VT_2 的放大系数为 β_1 和 β_2，该电路的总放大系数就是 $\beta=\beta_1\beta_2$。</div>
<div>4) 输入电阻增大</div>	<div>当通过 C_1 耦合过来的交流信号升高时，经两级跟随，VT_2 的发射极电位也随着升高，由于 C_2 的通交阻直作用，R_3 两端间的电压维持不变，使 R_3 对于交流信号相当于开路。所以 VT_1 的输入电流保持不变，相当于提高了电路的输入电阻。</div>

3.4.4 常见负反馈放大电路

1. 电路原理图

常见负反馈放大电路如图 3-25 所示。其中， U_s 是直流电压源，为放大器提供给定（或激励）信号； C_1 、 C_2 是耦合电容，具有隔直作用； U_o 为输出电压； R_f 是反馈电阻，通过它将输出信号反馈到放大器的输入端； R_e 为 VT_2 发射极电阻； R_c 为 VT_1 的集电极电阻。

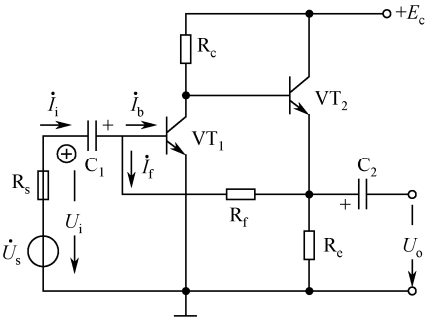


图 3-25 负反馈放大电路

图中， VT_1 、 VT_2 和阻容器件构成两级直接耦合放大器。

2. 反馈极性确定

当输入信号 U_i 的极性为“+”（对地）时，经 VT_1 等组成的第一级放大后，输出电压极性为“-”，再经由 VT_2 等组成第二级的射极跟随电路放大后的输出电压的极性仍为“-”。

两端的瞬时电压极性决定了 R_f 中反馈电流的瞬时流向，如图 3-25 所示。由于 I_f 的分流作用，使得放大电路的有效输入信号（即 $I_b = I_i - I_f$ ）减弱，所以电路中的反馈为负反馈。

3. 电路特点

负反馈放大电路的三极管 VT_1 的真正输入信号 I_b 是 I_i 和 I_f 的差值，电路的输出是 VT_2 的发射极。这是一个深度负反馈电路，其特点是电路的输出电压和输入电压反相，输入阻抗高，输出阻抗低，失真小，频带宽，工作稳定。

3.5 功率放大器

功率放大器（简称功放）是指在满足失真度条件下，产生较大功率输出以驱动负载的放大器。从能量控制的角度看，功放电路和电压放大电路没有本质区别；前者使负载获得需要的不失真功率，后者使负载得到不失真电压。功率放大器中使用的是大功率三极管。

3.5.1 大功率三极管

1. 外形

大功率晶体管是在高电压、大电流条件下工作的晶体管，一般是指允许耗散功率等于和大于 5W（有的定义为大于 1W）的三极管（见图 3-26）。

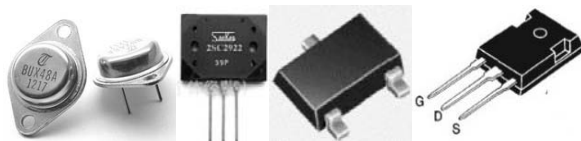


图 3-26 大功率三极管

2. 分类

按特征频率可分为高频大功率三极管（即 $f(T) > 3\text{MHz}$ ）和低频大功率三极管（即 $f(T) < 3\text{MHz}$ ）。

3. 特点

- (1) 耐压高，工作电流大。
- (2) 主要采用金属或塑料封装，体积较大。
- (3) 通常配带或自带散热器或散热片。
- (4) 各电极的引线较粗且硬，集电极引线与金属外壳或散热片相连，金属外壳就是管子的集电极；塑封三极管的集电极是自带的散热片。

4. 应用

大功率三极管广泛应用于高、中、低频功率放大（如电视机、扩音机、音响等）电路、

稳压电源电路、开关电路、驱动电路、通信设备的功率输出电路等。

5. 大功率管的检测

检测中、小功率三极管的极性、类型及性能的各种方法对检测大功率三极管来说基本上适用。

1) 利用万用表

由于大功率三极管的工作电流、PN 结面积和反向饱和电流都比较大，通常使用 R×10 或 R×1 挡检测大功率管。

由于大功率三极管的型号多，引脚排列也不尽一致，因此最好是用万用表测量发射极—基极（即 EB）和集电极—基极（即 CB）之间的正向电阻，CB 的正向电阻应小于 EB 的正向电阻阻值。也就是集电极与基极的正向电阻小于发射极与基极的正向电阻。

2) 目测引脚

（1）金属封装：对于金属封装的功率管，面对引脚端面，且引脚距离螺孔小的部分朝上，左脚为基极，右脚为发射极，壳体为集电极。

（2）塑料封装：对于塑封功率管，面对型号端面，引脚朝下，左脚为基极，中脚及背面散热器为集电极，右脚为发射极。

6. 功放对管

在推挽式功率放大电路中，尽可能使用一对各项参数相近的晶体管，这两个三极管也被称作对管。选择对管的主要目的是防止非线性失真。

常见功放对管有 D1559/B1079、2SA1553/2SC4029、2SA1494/2SC3858、B1588/D2439、2SA1216/2SC2922、STD03N/STD03P、2SA1695/2SC4468 等。

对管就是把噪声系数、特性曲线、放大系数等参数都尽可能一致的两个晶体管制作在一个基底上、封装在一个管壳内而成的晶体管。用对管构成的直流放大器可以在相当大的程度上消除晶体管本身的噪声、温度变化造成的零点漂移和有效抑制共模信号对差模信号的影响。

3.5.2 大功率三极管主要参数

1. CA 系列高频大功率三极管主要参数（见表 3-7）

表 3-7 3CA 系列高频大功率三极管主要参数

型号	P_{CM} (W)	I_{CM} (A)	BV_{EBO} (V)	BV_{CEO} (V)	I_{CBO} (mA)	h_{fe}	f_T (MHz)
3CA564	20	2	≥ 5	≥ 200	—	≤ 90	5
3CA940	25	1.5	≥ 7	≥ 150	≤ 0.01	40~140	4
3CA834	30	3		≥ 60	≤ 0.1	60~200	9
3CA2955	115	15	≥ 5	≥ 100	≤ 1	20~70	2.5
3CA1301	120	12		≥ 160	≤ 0.005	55~160	30
3CA1303	125	14		≥ 150	≤ 0.1	≥ 50	50
3CA1294	130	15		≥ 230		≥ 40	35
3CA1386				≥ 160			≥ 50
3CA1943	150			≥ 230	≤ 0.005	55~160	25
3CA1493				≥ 200	≤ 0.1	≥ 30	20
3CA1215				≥ 160		≥ 50	50

2. 电视机用大功率三极管主要参数（见表 3-8）

表 3-8 电视机用大功率三极管主要参数

型号	P_{CM} (W)	I_{CM} (A)	BV_{EBO} (V)	BV_{CEO} (V)	I_{CEO} (mA)	h_{fe}	参考型号
3DD850	50	3	≥ 5	700	≤ 1.5	≥ 8	2SD850
3DD820		5		600			2SD820
3DD905		8		650			2SD905
3DD1455		5		800			2SD1455
3DD869		3.5		600			2SD869
3DD870		5					2SD870
3DD871		6					2SD871
3DD1942		3		800			2SC1942
3DD951	65	5		1500	≤ 3		2SD951
3DD852	70	800		2SD852			
3DD821	50	6		600			2SD821
3DD822		7					2SD822
3DD200	30	3		100	0.5	≥ 30	2SD251
3DD201	50	8		150		≥ 40	2SD45
3DD202A		3		500	0.7	7~30	2SD627
3DD202B				600			
3DD203		15		1	60	0.5	≥ 50
3DD204	30	3		75	BLY48A		
3DD205	15	1.5		150	≥ 40		2SC783
3DD206	25			400	≥ 30		2SD656
3DD207	30		≥ 5	60	0.1	≥ 40	2N4111
3DD208	50			200	0.5		2N2121

3. CD 系列低频大功率三极管主要参数（见表 3-9）

表 3-9 CD 系列低频大功率三极管主要参数

型号	P_{CM} (W)	I_{CM} (A)	BV_{EBO} (V)	BV_{CEO} (V)	I_{CEO} (mA)	h_{fe}
3CD3A-H	10	1	3	A—30 B—30 C—80 D—110 E—150 F—200 G—250 H—300	≤ 2	A~E: 15~240 F~H: 15~180
3CD4A-H	20	2	4			
3CD5A-H	30	3				
3CD6A-H	50	5				
3CD8A-G	100	10			≤ 3	
3CD9A-F	150	15				
3CD11A-F	300	30				≥ 10
3CD102A-F	5	1	3		≤ 1	20~300
3CD103A-F	10					20~200
3CD104A-F	15	2				20~150
3CD105A-F	45	5			≤ 1.5	15~100
3CD106A-F	75	7.5			≤ 2	
3CD107A-F		13				
3CD108A-F	150	15			≤ 3	15~120
3CD109A-F	225	20			≤ 4	

3.5.3 达林顿管

达林顿管（又称复合管）是指将两个或多个三极管串联成一只等效的、具有较大电流放大系数及较高输入阻抗的新型三极管。

1. 分类

达林顿管可分为普通达林顿管和大功率达林顿管；有插装和贴装两类。

普通达林顿管	普通达林顿管通常由两只晶体管或多只晶体管复合连接而成，内部不带保护电路，耗散功率一般在 2W 以下。普通达林顿管一般采用 TO-92 塑料封装，主要用于高增益放大电路或继电器驱动电路等。
大功率达林顿管	大功率达林顿管在普通达林顿管的基础上，增加了由泄放电阻和续流二极管组成的保护电路，稳定性好，驱动电流大。大功率达林顿管一般采用 TO-3 金属封装或采用 TO-126、TO-220、TO-3P 等塑料封装，主要用于音频功率放大、电源稳压、大电流驱动、开关控制等电路。

2. 达林顿管内部电路

达林顿管内部电路通常有四种接法，即 NPN+NPN、PNP+PNP、NPN+PNP、PNP+NPN。前两种是同极性接法，后两种是异极性接法，其等效三极管位于旁边，具体如图 3-27（a）、（c）、（b）、（d）所示。

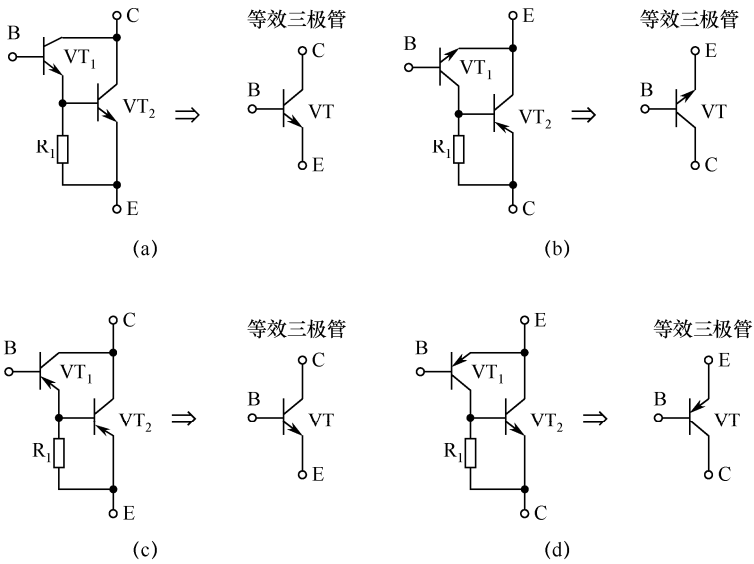


图 3-27 四类达林顿管的内部连接及其等效三极管

NPN+NPN 的同极性连接	NPN+NPN 的同极性连接时，前管基极为达林顿管的基极 B；两管集电极连接在一起作为达林顿管的集电极 C；前管的发射极和后管的基极连接在一起；后管的发射极为达林顿管的发射极 E。PNP+PNP 的内部电路是相似的。
----------------	--

NPN+PNP 的异极性连接	NPN+PNP 的异极性连接时，达林顿管的集电极 C 为后管 VT ₂ 的发射极；基极 B 为前管 VT ₁ 的基极；发射极 E 为前管 VT ₁ 的发射极，也是后管 VT ₂ 集电极。等效三极管 C、B、E 的引脚和极性与前管 VT ₁ 相同，即为 NPN 型。PNP+PNP 的异极性连接和此相似。
----------------	--

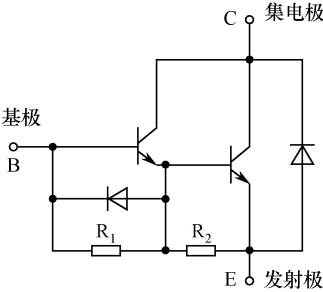
3. 工作原理

达林顿管在合适的外加电压下，每只三极管均工作在放大区，其放大系数是原来二管放大系数之积。所以它的放大系数非常高，可达几千至几十万倍；但这类高放大系数的达林顿管只能在输入小信号、小功率下使用。

4. 典型应用

- (1) 大功率开关电路，主要用于电机调速、逆变电路等。
- (2) 驱动小型继电器等。利用 TTL 或 CMOS 等电路经过达林顿管驱动小继电器、蜂鸣器等。
- (3) 驱动 LED 智能显示屏。LED 智能显示屏是由微型计算机控制、以 LED 矩阵板作显示器的系统，可显示各种文字及图案。系统中的行驱动器 and 列驱动器均可采用高 β 、高速、低压降的达林顿管，控制 LED 矩阵板上相应的像素发光。

5. 使用注意事项

1)用万用表测试时	<p>高速达林顿管的前管的 BE 结往往反并联一只输入二极管，如图 3-28 所示。这时测出的 BE 结正反向电阻阻值非常接近，但管子仍然是好的，不要误判为坏管。</p>  <p>图 3-28 含有二极管的达林顿管</p>
2) 类型判断	前面的三极管是什么类型，达林顿管就是什么类型，与第二只管的类型无关。
3)非达林顿管结构	当两个晶体管的工作电流冲突时，构成的电路不是达林顿管结构。
4) 改善热稳定性	<p>达林顿管通常用在大功率输出电路中。由于功率大，造成温度上升，导致达林顿管整体热稳定性差。为此，常采用以下措施。</p> <div><div>(1) 内含均衡电阻。大功率达林顿管内部设有均衡电阻 R_1 和 R_2，以均衡 VT₁、VT₂ 的基极电压，提高管子的热稳定性，还能有效地提高末级功率三极管的耐压。</div><div>(2) 阻尼二极管。在大功率达林顿管末级三极管的集电极与发射极之间反向并联阻尼二极管，以防负载短路时被击穿。带有均衡电阻和阻尼二极管的达林顿管的内部电路如图 3-29 (a)、(b) 所示。</div></div>

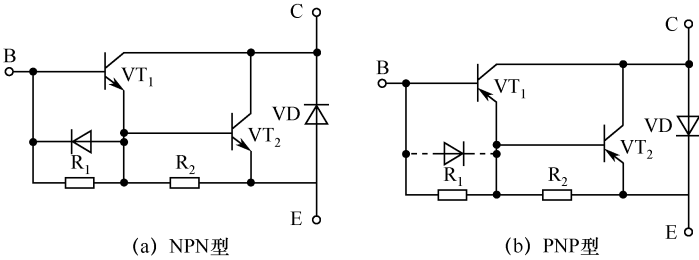


图 3-29 带有电阻和二极管的达林顿管的内部电路

6. 达林顿管模块与阵列

1) 达林顿模块（见图 3-30）



图 3-30 达林顿模块

2) 组成

达林顿模块是把达林顿管、续流二极管、辅助电路等做在一个模块内。它可靠性高，使用方便。由于模块内器件的多少、连接方式不同，模块也有多种型号。模块的额定电流一般在几十至几百安，耐压多在几百伏到一千多伏。

3) 连接

实际中常用达林顿模块的内部连接除图 3-28、图 3-29 所示外，还有如图 3-31 所示模块。图上的三个二极管中，下面两个是加速二极管，上面的为续流二极管。加速二极管的原理是引进了电流串联正反馈，达到加速的目的。

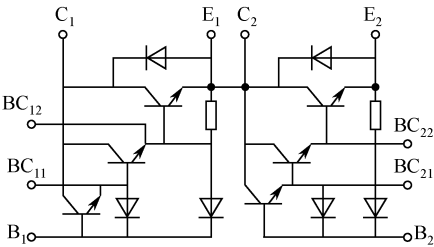


图 3-31 达林顿模块的内部连接

4) 达林顿管阵列（驱动器电路）

常见达林顿管阵列有插装和贴装两种，外形如图 3-32 所示。

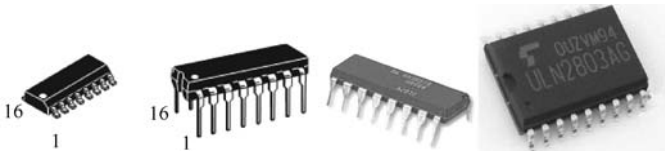
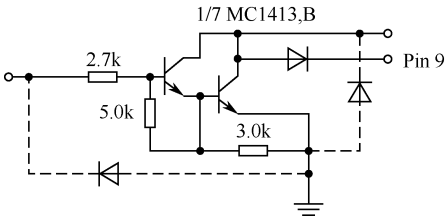
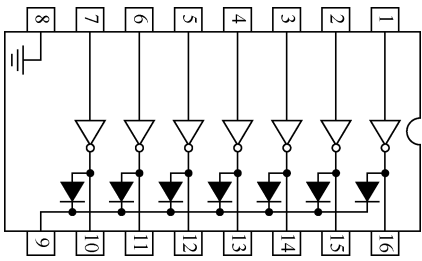


图 3-32 驱动器电路（达林顿管阵列）

5) 电路原理图

集成电路中的驱动器（如 MC1413、ULN2003 等）基本上都是由达林顿管阵列构成的。其内部电路是由多个达林顿管组成的阵列。驱动器 MC1413 内部单元电路如图 3-33 所示。

5) 电路原理图	<div></div> <p>图 3-33 阵列中单元电路</p>
6) 驱动器电路引脚	<div><p>驱动器电路的引脚排列如图 3-34 所示。</p></div> <p>图 3-34 阵列（MC1413）引脚排列</p>
7) 主要参数	<p>达林顿管阵列的输入信号可以是 6~15V 的 PMOS、CMOS 电平，也可以是 5V 的 TTL、CMOS 电平。有的阵列（如 ULN2003A）电路的电流增益大于 1000；负载能力强，输出电流大于 500mA；工作温度范围为-40~85℃；工作电压高于 50V。有些达林顿管阵列含有反向电压抑制二极管，耐压高，可稳定驱动感性负载。</p>
8) 主要应用	<p>达林顿管阵列主要用于驱动 LED 显示、伺服电机、步进电机、电磁阀、可控照明灯、小功率灯组、继电器阵列等。</p>

7. 达林顿管主要参数

1) 常见达林顿管主要参数（见表 3-10）

表 3-10 常见达林顿管主要参数

型 号	P_{cm} (W)	I_{cm} (A)	V_{ceo} (V)	等效管类型	封装
2N6042	75	8	100	PNP	TO-220
2SB795	10	1.5	80	PNP	TO-126
BD645	62	8	60	NPN	TO-220
BD646	62	8	60	PNP	TO-220
BDW42	85	15	100	NPN	TO-220
BDW53D	40	4	120	NPN	TO-220
BDX34	70	10	45	PNP	TO-220
BDX34A	70	10	60	PNP	TO-220
BDX53	60	8	45	NPN	TO-220
BDX53A	60	8	60	NPN	TO-220
KSD5018	40	4	275	NPN	TO-220
TIP102	80	8	60	NPN	TO-220
TIP105	80	8	60	PNP	TO-220
TIP150	80	7	300	NPN	TO-220

2) 贴装达林顿管主要参数（见表 3-11）

表 3-11 贴装达林顿管主要参数

型号	V_{CBO} (V)	V_{CEO} (V)	I_C (mA)	放大系数	V_{CES} (max) (V)	P_D (mV)	f_t (MHz)	极性
FMMT614	120	100	500	5000	1.0	500	100	NPN
FMMT38A	80	60	300	1000	1.25	330		
FNNT38B				4000				
FMMT28C				10000				
BCV47			500	2000	1.0		170	
BCV27	4000							
FMMTA14	40	30	300	10000	0.9		100	
FMMTA13		40						
FMMTA12	20	20		20000	1.0			

3.5.4 功放电路

1. 功放的分类

1) 按功能分类

(1) 前级

前置放大器是功放之前的预放大和控制部分电路，用于增强信号的电压幅度，提供输入信号选择、音调调整和音量控制等功能。其输出为后级功放的输入信号。

(2) 后级

主要是进行功率放大，且放大系数较高，放大后信号的失真度很低。后级功放除包括放大电路外，一般还包含有短路、过压、过热、过流等保护电路。

(3) 合并式功放

是将前置放大器和后级放大器合并为一台功放，兼有二者的功能，通常所说的家用功率放大器都是合并式的。一般情况下，合并式功放较前级、后级功放的重放效果差，但合并式功放的价格便宜，使用方便，且能够满足一般家用电器的需要。

2) 按用途分类

(1) AV 功放。AV（即音频、视频英文缩写）功放是为家庭影院设计的放大器，一般都具备 4 个以上的声道及环绕声解码功能，且带有一个显示屏。具有杜比解码器、音频编码器 3（AC3）、数字影院系统（DTS）解码器、五声道功率放大器和数字信号处理（DSP）电路，可为各种节目播放提供不同的声场效果。

(2) HI—FI 功放（高保真功放、发烧友功放）。一般为两声道设计，集多种高新技术于一身，可高保真地重现音乐的固有音色，功率一般在 2×150W 以下，音色优美。HI—FI 功放又分为分体式（即把前级放大器独立出来）和合并式（即前级和后机做成一体）。在同档次的机型中，分体式在信噪比、声道分割度等指标上高于合并式，但合并式使用方便，造价低。

(3) 卡拉 OK 功放

KALAOK 功放由混响器（从 BBD 模拟混响到 DIGETAL 数字混响）、变调器、话筒放大器等构成，是一种专用功率放大器。

3) 按管的导电方式分类

(1) A 类（甲类）功率放大器。A 类放大器的静态工作点 Q 设定在负载线的中点附近，三极管在输入信号的整个周期内全导通。放大器可单管工作，也可以双管推挽工作，属于模

拟放大器。由于放大器工作在特性曲线的线性区，瞬态失真和交越失真较小，是声音理想的功放电路。

电路的特点是在信号的整个周期内（正弦波的正负两个半周），放大器的任何功率输出元件都有电流输出。但在工作期间会产生很多热量，效率很低；优点是无交越失真。单端放大器都是A类工作方式，推挽放大器可以是A类，也可以是B类或AB类。

瞬态失真（又称瞬态响应）是指当较大的瞬态信号突然加到放大器输入端时产生的失真。它包括瞬态互调失真和转换速率低而导致的失真。

瞬态互调失真是指当输入脉冲信号时，输出瞬间过载而产生的削波失真。转换速率过低引起的失真是指低电平的输入脉冲突然加在放大器的输入端、由于放大器响应时间太长使输出信号的变化跟不上输入信号的迅速变化而引起的瞬态失真。

交越失真是指因三极管的门限电压不是零、而输入电压较低时，输出电压与输入电压不存在线性关系而产生的失真。由于这种失真出现在过零值处，因此被称为交越失真。为避免交越失真，在实用电路中都尽量使每一个三极管都处于微导通状态，一旦加入输入信号，马上可以进入线性工作区。

A类放大器的电路简单，调试方便；缺点是效率较低（一般小于30%），输出功率较小，功耗较大。

（2）B类（乙类）功率放大器。B类功放是指正弦波信号的正负两个半周分别由推挽输出级的两管轮流放大输出的一类放大器，每个三极管的导电时间为信号的半个周期。

在无信号输入时，输出端几乎不消耗功率。在输入信号的正半周，一个三极管导通、另一三极管截止，输出信号的正半周。当输入信号为负半周时，两管的工作状态转换，导通的转为截止、截止的转为导通，输出信号的负半周。

B类放大器的优点是效率高；缺点是会产生交越失真。由于B类放大器工作时，输入信号在 $-0.6\sim 0.6\text{V}$ 之间时，两硅三极管都无法导通而产生交越失真。这类放大器属于模拟放大器。

（3）AB（甲乙类）类功率放大器。

AB类功放介于A类和B类之间，也属于模拟放大器。三极管的导通时间大于半个信号周期而小于全信号周期，两管推挽式工作，效率高于A类放大器，因此获得广泛应用。

（4）C（丙类）类功率放大器。

C类功放的三极管导通时间小于半个信号周期，效率一般在90%以上。适用于大功率工作场合。

C类放大器的电流波形失真太大，不适用于低频功率放大。一般用在谐振功率放大等高频放大电路中。

（5）D类（丁类）功率放大器（又称谐振功率放大器、开关放大器、数字音频功率放大器、数字式放大器）。工作原理不同于前述四类放大器。

D类功放利用极高频率的转换开关电路放大音频信号，是一种将输入的模拟音频信号或PCM（脉冲编码调制）数字信息变换成PWM（脉冲宽度调制）或PDM（脉冲密度调制）的脉冲信号输出、控制大功率开关器件通/断的音频功率放大器。D类功放采用先进数字处理技术，可精确还原音频信号，功率转换效率可高达90%，寿命长，可靠性、安全性高；瞬态响应好，令声音细节重放更丰富；整个频段内无相移，声场定位准确，保证在 $20\text{Hz}\sim 20\text{kHz}$ 内得到平坦的幅频特性和很好的相频特性；具有很强的抗干扰能力，音质更纯净透彻。但抗电磁干扰能力较差，辐射比较大，最高工作频率受开关转换所产生功耗的限制，在有源超低音音箱中多有应用。

(6) T 类功率放大器。T 类功放的核心技术是数字功率处理技术 (DPP)，采用通信技术中处理小信号的自适应算法及预测算法，将输入的音频信号和进入扬声器的电流经过 DPP 数字处理后，用于控制大功率三极管的导通与关断，使音质实现高保真的线性放大。

T 类放大器的功率输出电路和脉宽调制型 D 类放大器相同，三极管工作在开关状态，切换频率不固定，效率和 D 类功放相当；但动态范围更宽，频率响应更平坦，保真度、线性度等性能好于传统的模拟 AB 类功放。

(7) K 类功率放大器。K 类功放是一种集成形式的功率放大器，它把自举和功放集成在一起。可根据实际需要，将它设置为 AB 类放大器，也可以设置为 D 类放大器等。

(8) H 类功率放大器。H 类功放是一种特殊应用型放大器，其主要特点是电源电压可以跟着输出电压的变化而变化。现已基本被 D 类功放所代替。

(9) DT 类功率放大器。DT 类功放是 D 类功放的一种特殊改进型，主要用在方波发生器上，是一个很特殊的开关电源。DT 类功放的音色好于 D 类功放，但不如 A~C 类功放。

(10) G 类功率放大器。G 类功放能在两个分立的电源电压间切换。在通常状态下输出低电压，但在信号电平需要时可切换到高电压。实际应用与 H 类功放相似，但使用范围有限。

(11) S 类功率放大器。S 类功放跟 A、AB 类很接近，主要是前面增加了惠斯通电桥。

4) 按输出级放大元件的数量分类

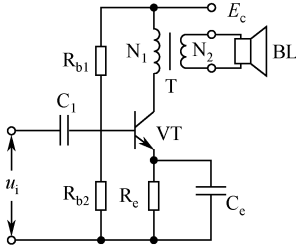
按输出级放大元件的数量可以分为单端放大器和推挽放大器。

(1) 单端放大器。其输出级由一只放大元件 (或多只元件并联成一组) 完成对信号正负两个半周的放大。单端放大器只能取甲类工作状态。

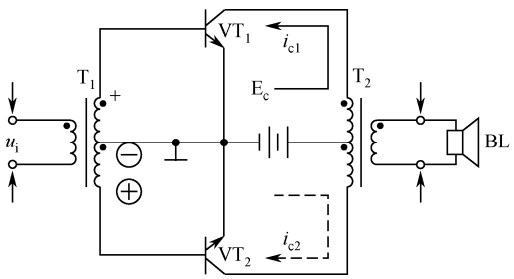
(2) 推挽放大器。其输出级有两个臂 (两组放大元件)，一个臂的电流增加时，另一个臂的电流则减小，二者的状态轮流转换。对负载而言，好像是一个臂在推，一个臂在拉，共同完成电流输出任务。尽管 A 类放大器可以采用推挽式工作，但通常是用推挽放大构成 B 类或 AB 类放大器。

2. 常见功率放大电路

1) A 类单管功率放大器

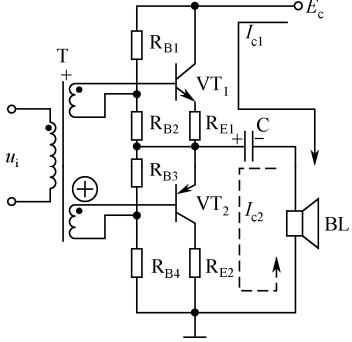
<p>(1) 电路构成</p> <p>A 类单管功放电路如图 3-35 所示。图中，C_1 是输入耦合电容；N_1、N_2 是输出变压器的一次、二次绕组的匝数；BL 是扬声器；集电极电阻 (即负载电阻) 是将负载电阻 R_L (即扬声器内阻) 通过变压器匝数比折算过来的，变压器起阻抗变换作用；R_{b1}、R_{b2} 为偏置电阻；R_e 为发射极电阻；E_c 是工作电源。</p>	
<p>(2) 工作原理</p> <p>由于电路的静态电流较大，集电极损耗也大，效率大约为 35%。三极管的这种工作状态被称为 A 类工作状态。通常用于需要功率较小的场合，其输入方式可以是变压器耦合，也可以是 RC 耦合。</p>	<p>电路中的偏置电阻确定三极管始终处于导通状态，工作在特性曲线的线性区。在输入信号的正半周，三极管 VT 的基极电流增大，集电极电流增大，输出功率增大，扬声器发出的声音增强。在输入信号的负半周，声音减弱，但失真较小。</p>

2) B 类推挽功率放大器

<p>(1) 电路组成</p> <p>常见 B 类推挽功放电路如图 3-36 所示。图中, BL 为扬声器, E_c 为电源电压。放大器是由两个单边功放电路并联组成的对称电路。其中, T_1 是副边绕组带中心抽头的输入变压器; T_2 是原边绕组带中心抽头的输出变压器; 圆形黑点表示的是变压器绕组的同名端 (即电压极性相同)。VT₁、VT₂ 是两个参数基本一致的三极管, 一般采用功放对管。</p>	
<p>(2) 工作原理</p> <p>两管交替工作的电路形式称为推挽电路。因此, B 类功率放大电路称为推挽式功率放大电路。</p>	<p>无输入信号 ($u_i=0$) 时: 放大器在没有输入信号时, 两个管子都处于截止状态, 静态电流几乎是零。</p> <p>有输入信号时: 当输入信号是正弦波的正半周时, VT₁ 导通, VT₂ 截止; 在输入信号的负半周时, VT₂ 导通, VT₁ 截止。两个管子交替流过的电流在输出变压器 T_2 中合成, 使扬声器 (负载) 得到正弦波信号输出。</p>
<p>(3) 电路特点</p>	<p>B 类推挽功率放大器的输出功率大, 失真小, 效率较高, 一般可达 60% 以上。</p>

3) OTL 功率放大器

OTL 功率放大器 (也称 OTL 电路、无输出变压器功放电路) 是一种输出级与负载之间采用电容耦合的功放电路, 是高保真功率放大器的基本电路之一。

<p>(1) 电路组成</p> <p>有输入变压器的 OTL 电路如图 3-37 所示。图中, 输入变压器有两个相同副边绕组; VT₁ 是 NPN 管、VT₂ 是 PNP 管, 两管参数一致, 互补对称, 串联。输出电容 C 有隔直、储能功能, 单电源 E_c 供电; 两个三极管的偏置电阻 $R_{B1} \sim R_{B4}$ 阻值相同。</p>	
<p>(2) 工作原理</p>	<p>无输入信号时: 无输入信号 (即静态) 时, VT₁、VT₂ 处于截止状态, 流过的电流很小; 电容 C 上充有对地为 E_c 的直流电压。</p> <p>有输入信号时: 在输入信号的正半周, VT₁ 导通, VT₂ 截止, 流经扬声器的集电极电流 I_{c1} 方向如图中实线所示, 扬声器 BL (即负载 R_L) 得到放大后的正半周输出信号。在信号的负半周, VT₁ 截止, VT₂ 导通, 流经集电极电流 I_{c2} 的方向如图中虚线所示, 扬声器 BL 得到放大后的负半周输出信号。这个电路中的电容器 C 上的电压相当于三极管 VT₂ 的电源电压。</p>

(3) 性能特点	采用单电源供电；输出端直流电压为电源电压的一半；输出端与负载之间采用大容量电容耦合，负载（扬声器）的另一端接地；具有恒压输出特性；配接的扬声器阻抗可以是 4Ω 、 8Ω 或 16Ω 。
----------	---

4) OCL 功率放大器

OCL 功率放大器（又称无输出电容功放电路、B 类互补对称电路、OCL 电路）是在 OTL 电路基础上发展起来的功放电路。

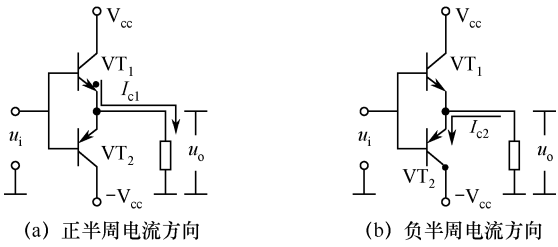
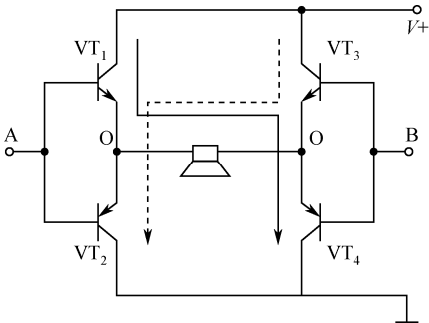
(1) 电路构成 OCL 功放电路如图 3-38 所示。图中，两个三极管 VT_1 、 VT_2 分别为 NPN 管和 PNP 管，两管的特性相近，一般称为互补对管；双电源供电；负载（可以是扬声器）一端接地，一端直接与放大器输出端连接。		 <div>(a) 正半周电流方向</div> <div>(b) 负半周电流方向</div>
(2) 工作原理	无输入信号（即静态）时	无输入信号（即静态）时，两管处于截止状态，流过的电流很微小，输出信号为零。
	有输入信号时	VT_1 （NPN 管）在正半周导通，见图（a）， VT_2 （PNP 管）截止，负载中电流方向由上向下；在负半周时， VT_1 截止， VT_2 导通，见图（b），负载中电流方向由下向上；两管实现互补，使得负载在输入信号的全周期都有电流流过。
(3) 性能特点	VT_1 、 VT_2 两管互相补充对方的不足，所以这种电路又称为互补对称电路；输出端的直流电平为零；电路中无输出耦合电容器，输出级与扬声器直接相连，输出信号的低端频响得到了很大的改善，具有良好的低频特性、恒压输出特性；允许配接的扬声器阻抗可以是 4Ω 、 8Ω 或 16Ω ；最大输出电压振幅为电源电压值。若正负电源电压值取 OTL 电路单电源电压值的一半，则两种电路的额定输出功率相同；采用正负两个电源，便于获得直流零电平；一般应用在音质要求较高的场合。	

图 3-38 OCL 功放电路

5) 桥式推挽输出功率放大器

桥式推挽输出功放电路如图 3-39 所示。电路特点是器件少，效率高。

(1) 电路构成 图中，四个三极管 $VT_1 \sim VT_4$ 采用桥式连接，负载（即扬声器）接在两个“O”点之间；输入端 A、B 接差动输入信号；单电源 V 供电。	
图 3-39 桥式推挽输出功放电路	

(2) 工作原理	(1) 无输入信号时，四个管子皆不导通，输出电流为零，扬声器无声。
	(2) 有输入信号时，在信号的正半周， VT_1 和 VT_4 导通， VT_3 和 VT_2 截止，电流的通路如图中实线所示；在信号的负半周， VT_3 和 VT_2 导通， VT_1 和 VT_4 截止，电流的通路如图中虚线所示。在输入信号的整个周期内，扬声器内皆有电流流过，发出的声音随输入信号的变化而变化。

3. 功放主要参数

1) 输出功率

输出功率是指功放电路输送给负载的功率，主要有标称输出功率、最大瞬间输出功率、音乐输出功率和峰值音乐输出功率。

(1) 标称输出功率 (P_{RMS})。	标称输出功率（又称额定输出功率、最大有用功率、持续功率、不失真功率等）是指在允许的谐波失真范围内，放大器长时间、可靠工作时所能输出的最大功率（严格说是正弦波信号）。 通常把谐波失真度为 1%时的平均功率称为标称输出功率，单位为 W/CH（瓦/声道）。规定的失真度不同，标称功率数值将不相同。
(2) 最大瞬间输出功率 (P_M)。	功率放大器在不考虑失真大小、不损坏情况下瞬间能输出的最大功率称为最大瞬间输出功率。其值远远高于其标称输出功率。
(3) 音乐输出功率 (MPO)。	音乐输出功率是指功放工作于音乐信号时的输出功率，是在输出信号失真度不超过规定值的条件下，功放对音乐信号的最大输出功率。
(4) 峰值音乐输出功率 (P_{MPO})。	峰值音乐输出功率（又称最大音乐输出功率）是功放在不考虑失真度、不损坏情况下、瞬间可以输出的最大音乐功率。 通常情况下，峰值音乐输出功率大于音乐输出功率，音乐输出功率大于最大瞬间输出功率，最大瞬间输出功率大于额定输出功率。

2) 频率响应

频率响应是指功率放大器对音频信号各频率分量的放大能力。功率放大器的频响范围应不低于人耳的听觉频率范围。在理想情况下，主声道音频功率放大器的工作频率范围为 20Hz~20kHz。

3) 总谐波失真 (THD)

总谐波失真是指高次谐波占基波的百分比。总谐波失真越小越好，新型功率放大器的总谐波失真已能达到 0.02%。

失真是重放信号的波形不同于原信号波形的现象。失真度是指输出信号同输入信号相比的失真程度，其数值越小越好，一般在 0.05%以下。

4) 动态范围

动态范围是指音响系统重放时最大不失真输出功率与静态时系统噪声输出功率之比的对数值。单位为分贝 (dB)。一般性能较好的音响系统的动态范围在 100 (dB) 以上。动态范围也可以是功率放大器不失真放大的最小信号与最大信号电平的值，单位是 dB (分贝)。高保真放大器的动态范围应大于 90dB。

5) 信噪比

信噪比是指功放输出的声音信号电平与输出的各种噪声电平之比，单位用 dB 表示。其数值越大表示声音越干净，携带的噪声越小。

6) 输出阻抗

输出阻抗（又称额定负载阻抗）是指功放输出端对负载（如扬声器）所表现出的等效内阻抗。输出阻抗通常有 16Ω、8Ω、4Ω、2Ω 等，此值越小，功率放大器的负载能力越强。

7) 输入阻抗

输入阻抗是指功率放大器抗干扰能力的大小，一般为 5~15kΩ。数值越大表示抗干扰能力越强。

8) 阻尼系数

阻尼系数（或阻尼因子）是指放大器的额定负载（如扬声器）阻抗与功率放大器实际输出阻抗的比值。一般希望功放的输出阻抗要小，阻尼系数要大。阻尼系数一般在几十到几百之间，优质功放的阻尼系数可高达 200 以上，但不能太大，太大会使扬声器发声单薄；太小则会使声音混浊，层次差。

9) 变化率

变化率（或转换率）是指单位时间内电压上升的幅度，单位为伏/微秒（V/μs）。它反映了功率放大器对瞬态声音信号的跟踪能力。

10) 传输增益

传输增益是指放大器输出功率与输入功率的比值，通常用 dB（分贝）来表示。功率放大器的输出增益随输入信号频率的变化而变化（增大或减小）。其分贝值越小，说明功率放大器的频率响应曲线越平坦，失真越小，信号的还原度和再现能力越强。

3.6 开关三极管及应用

开关三极管的外部形状与普通三极管相同，它工作于特性曲线的截止区和饱和区，相当于电路的关断和导通。

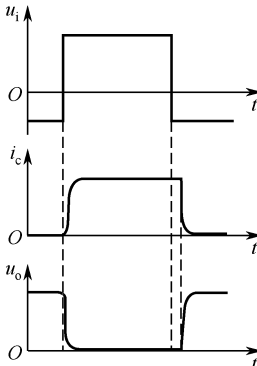
3.6.1 开关三极管

开关三极管是利用三极管的导通和关断状态的开关特性，在开关电路中用来控制电路的开启和关闭，由加在开关管基极上的脉冲信号来控制其“断开”和“接通”，是一个无触点电子开关。

开关三极管在工作过程中，由截止到导通或由导通到截止，都要经过特性曲线的放大区。在具体应用中需采用一定的方法、技术解决放大状态对三极管开关特性的影响。

1. 原理及特性

1) 分类及产品系列	(1) 分类	开关三极管因功率的不同可分为小功率、中功率和大功率开关管。
	(2) 产品系列	常用开关管有 3AK、3CK、3DK 等系列，此外还有 3DF、2SC、MJE 系列等产品。常用的高反压、大功率开关管有 2JD1556、2SD1455、2SD1553、2SD1497、2SD850 等，它们的最高反压都在 1500V 以上。

2) 工作原理 开关三极管正常工作过程就是基于三极管的开关特性, 在截止与饱和和导通两种状态间的快速转换。	(1) 截止状态	当加在三极管发射结的电压低于 PN 结的导通电压时, 基极电流为零, 集电极电流和发射极电流都为零, 集电极和发射极之间相当于开关的断开状态, 此状态称为三极管的截止状态。
	(2) 饱和和导通状态	当加在三极管发射结的电压大于 PN 结的导通电压、基极电流增大到一定程度时, 集电极电流不再随着基极电流的增大而增大, 而是在某一定值上下波动, 此时三极管失去电流放大作用, 集电极和发射极之间的电压降很小, 集电极和发射极之间相当于开关的接通状态, 此状态称为三极管的饱和和导通状态。
3) 三极管动态开关特性 在三极管开关电路中, 开关电路输出电压 u_o 的变化也必然滞后于输入电压 u_i 的变化, 如图 3-40 所示。	<div></div> <p>图 3-40 三极管动态开关特性</p> <p>三极管在截止与饱和和导通两种状态间迅速转换（即动态）时, 由于三极管内部电荷的积聚和消散都需要时间, 所以集电极电流 i_c 的变化将滞后于输入电压 u_i 的变化。</p>	
4) 性能特点	开关三极管可用小电流控制大电流的通断, 具有开关速度快、体积小、寿命长、安全可靠、无机械磨损等特点。	
5) 应用	<p>小功率开关管多用在电源电路、逻辑电路、驱动电路、高速饱和和开关电路等; 大功率开关管可用于彩色电视机、通信等设备的开关电源, 也可用于低频功率放大、电流调整电路; 高反压大功率开关管可用作彩色电视机行输出管等。</p> <p>三极管作为优良的开关元件被广泛用于计算机和自动控制领域。</p>	

2. 开关三极管的主要参数

1) 时间参数	(1) 存储时间 t_s	从输入脉冲下降沿最大值的 10%到输出脉冲下降沿最大值的 10%所需要的时间。
	(2) 下降时间 t_f	从输出脉冲下降沿最大值的 90%下降到 10%所需要的时间。
	(3) 上升时间 t_r	从输出脉冲上升沿的最大值的 10%增加到 90%时所需要的时间。
	(4) 延期时间 t_d	从输入脉冲到输入脉冲上升沿上升到最大值的 10%所需要的时间。
	(5) 开通时间 t_{on}	$t_{on}=t_d+t_r$
	(6) 关断时间 t_{of}	$t_{of}=t_s+t_f$

2) 集电极最大允许电流 (I_{cm})	三极管工作时的集电极电流超过一定数值时, 电流放大系数 β 将下降。为此规定电流放大系数 β 变化不超过规定值时的集电极最大电流为 I_{cm} 。
3) 基极开路时集电极-发射极反向击穿电压 (BV_{CEO} 或 V_{CEO})	加在集电极与发射极之间的电压超过这个数值时, 会产生很大的集电极电流, 这种现象叫击穿。三极管击穿后会造成永久性损坏或性能下降。
4) 集电极最大允许耗散功率 (P_{cm})	三极管工作时, 集电极电流在集电结上会产生热量而使三极管发热。若耗散功率过大, 三极管很容易烧坏。实际使用时, 在保证三极管可靠、长时间工作而不损坏的情况下所允许的最大三极管耗散功率。需要特别注意的是大功率三极管给出的最大允许耗散功率都是在加有规定散热器情况下的参数。
5) 特征频率 f_T	随着工作频率的升高, 三极管的放大能力将会下降, 对应于 $\beta=1$ 时的频率 f_T 叫作三极管的特征频率。

3. 常见开关三极管特性参数

1) 部分高反压、大功率开关三极管特性参数（见表 3-12）

表 3-12 部分高反压、大功率开关三极管特性参数

参数 型号	V_{CBO} (V)	V_{CEO} (V)	V_{EBOL} (V)	I_c (A)	i_{CP} (A)	P_{CTr} (-25℃)	T_i (℃)	T_{stg} (℃)	I_{CBO} (μA)	I_{CES} (mA)	I_{CEO} (mA)	I_{coat} (A)	h_{fe}	V_{CESot} (V)	V_{BESot} (V)	V_{CBOSUS} (V)	f_T (MHz)	t_f, V_F (μs), (V)
2SC1942	1500	800	6	3	6	50	150	-45~+150	<10					<5	<1.5		<1	
2SC2027	1500	800	7	5		50	150		<10					<5	<1.5		<0.1	
2SD850	1500	700	5	3	5	25	150	-60~+130	<50				4~15	<4	<1.5		<1	
BU208	1500	700	7	5	7.5	12.5	115	-65~+115		<1.0			2.2~5	<5	<1.5 >700	>7	<0.7	
BU209	1700	800	7	4	6	12.5	115	-65~+115		<1.0			2~25	<5	<1.5 >800	>7	<0.7	
BU208D	1500	700	7	5	7.5	12.5	115	-55~+115		<1.0			2~25			>7	<0.7	
2SD869	1500	600	5	0.5		50	150	-55~+150	<10				8~12	<8	<1.5	3	<1.0	1.6~2
2SD1543	1500	600	5	2.5		40	150	-55~+150	<10		<1.0		8~20	<8	<1.5	3	<1.0	
2SD1514	1500	600	5	3.5		40	150	-55~+150	<10		<1.0		8~20	<8	<1.5	3	<1.0	
2SD1545	1500	600	5	5		50	150	-55~+150	<10		<1.0		8~20	<5	<1.5	3	<1.0	
2SD1546	1500	600	5	6		50	150	-55~+150	<10		<1.0		8~20	<5	<1.5	3	<1.0	

续表

参数 型号	V_{CBO} (V)	V_{CEO} (V)	V_{EBOL} (V)	I_c (A)	i_{CP} (A)	P_{CTr-} 25C	T_i (C)	T_{stg} (C)	I_{CBO} (μ A)	I_{CES} (mA)	I_{CEO} (mA)	I_{coat} (A)	h_{fe}	V_{CESot} (V)	V_{BESot} (V)	V_{CBOSUS} (V)	f_T (MHz)	t_f, V_F (μ s), (V)
2SD1547	1500	600	5	7		50	150	-55~ 150	<10		<1.0		8~ 20	<5	<1.5	3	<1.0	
2SD1548	1400	600	5	1.0		50	150	-55~ 150	<10		<1.0		>8	<5	<1.6	3	<1.0	
2SD1426	1500	600	5	3.5		80	150	-55~ 150	<10				8~ 12	<8	<1.5	3	<1.0	1.6~ 2
2SD1427	1500	600	5	3		80	150	-55~ 150	<10				8~ 12	<5	<1.5	3	<1.0	1.6~ 2
2SD1355	1500	600	5	5		60	150	-55~ 150	<10				8~ 12	<5	<1.5	3	<1.0	1.6~ 2
S2000A		1500	5	5	7.5	12.5	115	-55~ 115		<1			> 2.25	<1	<1.5 >700	7	<0.7	
S2055		1500	5	6	7.5	12.5	115	-55~ 115		<1			> 2.25	<5	<1.5 >700	7	<0.7	1.4~ 2
S2055A		1500	5	5	7.5	12.5	115	-55~ 115		<1			> 2.25	<1	<1.5 >700	7	<0.7	1.4~ 2
S2055F		1500	5	5	7.5	60	150	-55~ 150		<1			> 2.25	<5	<1.5 >700	3	<0.7	1.4~ 2
S2055A F		1500	5	5	7.5	50	150	-55~ 150		<1			> 2.25	<1	<1.5 >700	3	<0.7	1.4~ 2
2SD1401	1500	800	7	3.5	10	60	150	-55~ 150	<10		<1.0		>8	<8	<1.5	3	<0.4	
2SD1402	1500	800	7	5	16	120	150	-55~ 150	<10		<1.0		>8	<5	<1.5	3	<0.4	
2SD1403	1500	800	7	6	16	120	150	-55~ 150	<10		<1.0		>8	<5	<1.5	3	<0.1	
2SD1489	1500	600	5	2.5		80	150	-55~ 150	<10		<1.0		8~ 20	<8	<1.6	3	<1.0	
2SD1577	1500	700	6	5	17	100	150	-55~ 150	<10		<1.0		4~ 15	<2	<1.3		<1.0	
BU509A	1500	700		8	15	125	150	-55~ 150		<1.0		4.5		<1.0	<1.3 >700	7	<0.7	
2SD1397	1500	800	7	3.5	10	80	150	-55~ 150	<10		40~ 130		>8	<8	<1.5	3	<0.4	<2
2SD1398	1500	800	7	3	18	120	150	-55~ 150	<10		40~ 130		>8	<5	<1.5	3	<0.4	<2
1SD1425	1500	600	5	2.5		80	150	-55~ 150	<10				8~ 12	<8	<1.5	3	<1.0	1.6~ 2

2) 低频大功率开关三极管主要特性参数（见表 3-13）

表 3-13 部分低频大功率开关三极管主要特性参数

型 号	P_{CM} (W)	I_{CM} (A)	BU_{CEO} (V)	I_{CEO} (mA)	h_{fe}	开关参数 (ns)		
						t_{cn}	t_c	t_f
3DK104A-F	15	1.5	A—30	≤ 0.5	15~180	≤ 0.4	≤ 1.5	≤ 0.3
3DK105A-F	50	3	B—50	≤ 1		≤ 0.5		≤ 0.4
3DK106A-F	75	5	C—80			≤ 0.6		
3DK107A-F	100	7.5	D—110	≤ 1.5	15~120	≤ 0.7	≤ 2	≤ 0.5
3DK108A-F	150	10	E—150			≤ 0.8		
3DK109A-F	200	15	F—200					
3DK204A-G	15	1.5	A—50	≤ 0.5	15~180	≤ 0.5	≤ 1.5	≤ 0.4
3DK205A-G	50	3	B—100	≤ 0.7		≤ 0.6	≤ 1.8	
3DK206A-G	75	5	C—150	≤ 1	15~120			
3DK207A-G	100	7.5	D—200	≤ 1.5		≤ 1	≤ 2.2	
3DK208A-G	150	10	E—250					
3DK209A-G	200	15	F—300 G—350					

3) 片状开关三极管主要特性参数（SOT-23 式封装）（见表 3-14）

表 3-14 部分片状开关三极管主要特性参数

型 号	V_{CBO} (V)	V_{CEO} (V)	I_C (mA)	h_{fe} (min/max)	V_{CES} (max) (V)	P_D (mW)	t_{off} (ns)
BSS79C	75	40	800	100/300	0.3	330	285
FMMT2222A			600				
FMMT4400	100/300			0.4			
FMMT4401			200		50/150		0.2
FMMT3903	100/300			0.4			
FMMT3904			600		100/300		0.4
FMMT2222	30	200		50/150			
FMMT4123			40		120/360		
FMMT4124	30						

4) 部分 3DK 系列中小功率开关三极管主要特性参数（见表 3-15）

表 3-15 部分 3DK 系列中小功率开关三极管主要特性参数

型 号	P_{CM} (mW)	I_{CM} (mA)	BU_{CBO} (V)	BU_{CEO} (V)	I_{CEO} (μA)	h_{fe}	开关参数 (ns)			f_T (MHz)
							t_{cn}	t_c	t_f	
3DK2A	200	30	≥ 30	≥ 20	≤ 0.1	≥ 25	\leq	≤ 40	\leq	≥ 150
3DK2B			\leq	≤ 20			\leq	≥ 200		
3DK2C			\leq	≤ 15			\leq	≥ 150		
3DK3A	100		≥ 20	≥ 15		≥ 40	\leq	≤ 20	\leq	≥ 300
3DK3B			\leq	≤ 10			\leq			
3DK3C			≥ 15	≥ 10						
3DK4A	700	800	≥ 40	≥ 30	≤ 1	40~	\leq	\leq	—	≥ 100
3DK4B			≥ 60	≥ 45		200	50	100		

5) 部分 3CK 系列小功率开关三极管主要特性参数（见表 3-16）

表 3-16 部分 3CK 系列小功率开关三极管主要特性参数

型 号	P_{CM} (mW)	I_{CM} (mA)	BU_{CBO} (V)	BU_{CEO} (V)	I_{CEO} (μ A)	h_{fe}	开关参数 (ns)			f_T (MHz)
							t_{cn}	t_c	t_f	
3CK1A	200	30	≥ 20	≥ 15	≤ 9.2		≤ 56	≤ 80		≥ 100
3CK1B			≥ 40	≥ 30						
3CK1C			≥ 60	≥ 45						
3CK1D			≥ 20	≥ 15						
3CK1E			≥ 40	≥ 30						
3CK1F			≥ 20	≥ 15						
3CK1G			≥ 30	≥ 25						
3CK1H			≥ 40	≥ 35						≤ 80
3CK2A	≥ 20	≥ 15								
3CK2B	≥ 40	≥ 30								
3CK3A	≥ 40	≥ 30								
3CK3B	≥ 60	≥ 45			≤ 150	≥ 100				
3CK3C	≥ 20	≥ 15								
3CK3D	≥ 40	≥ 30								
3CK3E	≥ 20	≥ 15								
3CK3F	≥ 40	≥ 30	≤ 1		≤ 56	≤ 30				

4. 肖特基钳位晶体管（SCT）

结构特点	<p>SCT 是在 NPN 晶体管的基极与集电极之间加接一个 SBD（即 Schottky 势垒二极管）的三极管。当三极管进入饱和状态时，集电结电压 U_{bc} 被钳位在 SBD 的导通电压（约 0.45V）上，从而避免三极管进入深饱和状态，缩短了三极管开关过程中的存储时间。</p> <p>在集成电路中，SCT 的信号传输延迟时间大大缩短（可降低至 2~4ns），提高了集成电路的工作速度。SCT 是制作高速数字集成电路的基本器件。</p>
SCT 工作的特点	<p>在 TTL 电路中，用 SCT 代替普通三极管，可较好地解决开、关速度对基极电流 I_b 大小要求上的矛盾（即快速导通要求 I_b 大，基区电荷存储多；而快速关断要求 I_b 小，基区电荷存储少）。</p> <p>在传输延迟时间与功耗的乘积一定时，采用 SCT 可设计出高速 TTL（STTL）、中速低功耗 TTL（LSTTL）两种 TTL 电路。</p>

3.6.2 三极管开关电路

1. 基本开关电路

1) 电路原理图
三极管基本开关电路如图 3-41 所示。图中， R_c 为负载电阻，基极接有基极电阻 R_b 。

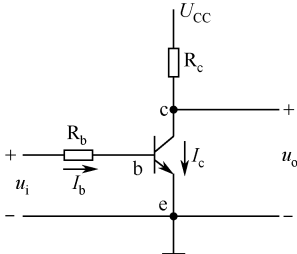
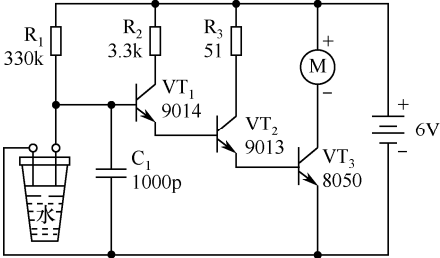


图 3-41 三极管基本开关电路

<div>2) 工作原理</div> <div>输入电压 u_i 控制着三极管开关的接通与关断。当三极管截止时，负载电流 I_c 消失；当三极管导通时，负载电流可以顺利流过。</div>	(1) 当输入电压 u_i 为低电压时，基极无电流流过，集电极也无电流，连接于集电极端的负载电阻亦没有电流流过。此时，相当于开关断开，三极管工作于特性曲线上的截止区。
	(2) 当 u_i 高于发射结导通电压时，基极有电流流动，集电极流过放大后的电流，负载电阻中有电流流过。此时，相当于开关接通，三极管工作于特性曲线上的饱和区。
	(3) 当电路参数配合得当时，只要 u_i 为低电平，三极管就工作在截止状态，输出为高电平；当输入电压 u_i 为高电平时，三极管就工作在饱和导通状态，输出为低电平。

2. 水位控制电路

<div>1) 电路原理图</div> <div>水位自动控制电路如图 3-42 所示。图中，VT_1、VT_2、VT_3 组成复合管，C_1 为旁路电容器，水箱内装有由两电极构成的水位传感器，M 为直流电动机，电路由单一电池组供电。电路中，VT_1 的基极只要输入微弱电流，$VT_1 \sim VT_3$ 皆可饱和导通。</div>	
<div>2) 工作原理</div>	电路中，两个电极接在 VT_1 下偏置电阻位置， R_1 为上偏置电阻。当桶内水面低于两个电极时，相当于下偏置电阻开路， R_1 产生的偏置电流使电动机启动并向水箱注水。当水位上升并淹没电极时，两个电极之间因水导通，将 R_1 产生的偏置电流旁路一部分，使 $VT_1 \sim VT_3$ 截止，电动机停转。
<div>3) 液位传感器</div>	最简单的液位传感器是采用两个电极，当水面淹没电极时，电极导通，但导通电阻值较大，约 $50k\Omega$ 。

3. 三极管开关电路特点

输入输出信号	电路的输入信号可以是脉冲信号，也可以是连续变化（如正弦波）的信号；输出信号是脉冲信号。
工作区	在开关电路中，三极管一定工作在饱和区和截止区，不能工作在放大区。
饱和深度	开关电路中的三极管避免工作在深度饱和区，否则会影响截止转换速度。
可靠截止	要保证开关电路中的三极管在输入信号为零时就能可靠截止。
可靠性	在三极管的基极接入一个负电源可保证工作的可靠性。
速度调节	三极管的开关速度不尽如人意时，可调整信号的输入频率。
开关速度	由开关三极管构成的开关电路，可以提高开关转换速度。

3.6.3 脉冲的基本知识

1) 脉冲	脉冲是指瞬间突变、作用时间极短的电压或电流信号。广义上讲，凡是非正弦规律变化的电压或电流都可以称为脉冲。
-------	--

2) 脉冲信号	脉冲信号就是像脉搏跳动一样的信号。它是一种离散信号，即波形在时间轴是不连续的，可以是周期性重复的，也可以是非周期性的或单次的。	
3) 脉冲波形 脉冲形状多种多样，常见的如图 3-43 所示。最常见的脉冲波是矩形波、尖顶波和方波。	<div data-bbox="476 239 1037 613"></div> <div data-bbox="639 639 878 666">图 3-43 常见脉冲波形</div>	
4) 周期性波和非周期性波 同样的脉冲波如果非周期性出现，则为非周期波，如图 3-44 (a) 所示；周期性出现的为周期性波，如图 3-44 (b) 所示。	<div data-bbox="496 700 1020 875"></div> <div data-bbox="591 904 927 931">图 3-44 周期性波与非周期性波</div>	
5) 单脉冲与双脉冲 在每一个时间周期内，同样的脉冲只出现一次时称为单脉冲信号，如图 3-45 (a) 所示；如在每一个时间周期内，两个同样的脉冲总是同时出现时，则为双脉冲信号，如图 3-45 (b) 所示。	<div data-bbox="491 1016 1028 1115"></div> <div data-bbox="579 1146 939 1172">图 3-45 单脉冲信号与双脉冲信号</div> <div data-bbox="421 1199 1143 1226">在实际应用中，双脉冲是在一个操作指令中同时产生的两个脉冲信号。</div>	
6) 脉冲串 在每一个时间周期内，同样的一组脉冲都按时出现，这组脉冲可称为脉冲串，如图 3-46 所示。	<div data-bbox="546 1321 970 1405"></div> <div data-bbox="675 1433 842 1460">图 3-46 脉冲串</div>	
7) 脉冲主要参数	(1) 脉冲宽度 (t)	每个脉冲的高电平持续的时间为脉冲宽度。用作晶闸管触发信号的脉冲一般有宽度要求，以确保晶闸管的可靠触发。
	(2) 脉冲（重复）频率 (f)	每秒中出现的脉冲数量称为脉冲重复频率。开关速度的快慢决定着脉冲频率的高低。
	(3) 脉冲（重复）周期 (T)	周期性重复的脉冲序列中两个相邻脉冲之间的时间间隔称为脉冲重复周期，它等于脉冲重复频率的倒数。

7) 脉冲主要参数	(4) 脉冲幅度 (U_m)	脉冲电压的最大变化幅值。
	(5) 上升时间 (t_r)	脉冲上升沿从 $0.1U_m$ 上升到 $0.9U_m$ 所需要的时间。
	(6) 下降时间 (t_f)	脉冲下降沿从 $0.9U_m$ 下降到 $0.1U_m$ 所需要的时间。
	(7) 正脉冲宽度 (t_{pw})	从脉冲前沿 $0.5U_m$ 起, 到后沿 $0.5U_m$ 为止的一段时间。
	(8) 负脉冲宽度 (t_{nw})	从脉冲后沿 $0.5U_m$ 起, 到下一个脉冲前沿 $0.5U_m$ 为止的一段时间。
	(9) 占空比(q)	正脉冲宽度和脉冲周期的比值, $q=t_{pw}/T$ 。
8) 脉冲信号与数字信号	数字信号就是有一定含义的脉冲信号。通常把脉冲高电平定义为 1, 低电平定义为 0, 这样表示二进制数字的脉冲信号就是数字信号; 当然也可以反过来定义低电平为 1, 高电平为 0。	
9) 应用	<p>(1) 脉冲信号可以用来表示信息, 也可以作为载波, 如脉冲调制中的脉冲编码调制 (PCM)、脉冲宽度调制 (PWM) 等。</p> <p>(2) 脉冲信号还可以作为各种数字电路、单片机、数字信号处理器、微处理器等高性能芯片的时钟信号。</p> <p>(3) 电子计算机内的数字信号也是有特定含义的脉冲信号。</p> <p>(4) 脉冲拨号是用脉冲的个数来表示号码数字。脉冲拨号方式对脉冲的宽度、大小、间距、形状都有着严格的要求, 如果由于线路的干扰或其他原因而使得这些参数发生了变化, 则可能引起号码接收的错误。</p> <p>(5) 脉冲信号可以用来计数, 是计数器、计时器的输入信号。</p> <p>(6) 晶闸管的触发信号一般为脉冲信号或双脉冲信号。</p> <p>(7) 开关电路的输入信号和输出信号都是脉冲信号。</p> <p>(8) 许多干扰信号也是脉冲信号。</p>	

3.6.4 逻辑电路

1. 基本逻辑符号

逻辑电路是开关三极管应用的重要领域。最常见的逻辑关系是与门、或门、非门。其相应的电路图形符号如图 3-47 所示。

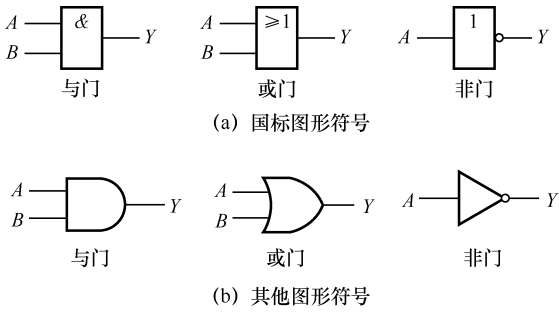
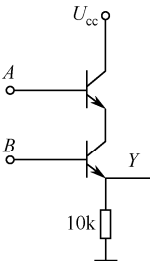
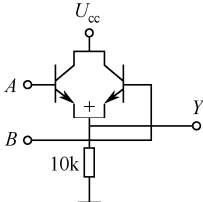
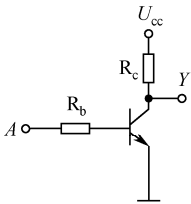


图 3-47 与门、或门、非门的图形符号

1) 与门 逻辑电路	<div><table data-bbox="449 232 704 418"><tr><th>A</th><th>B</th><th>Y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table><div>(a) 电路图 (b) 真值表</div></div> <div>图 3-48 三极管构成的与门电路</div>	A	B	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<p>由开关三极管构成的与门逻辑电路如图 3-48 所示。图中, A、B 是输入信号, Y 是输出信号; 其对应关系见图 3-48 (b), 表中, “1” 表示高电平, “0” 表示低电平。</p> <p>从真值表可以看出, 只有输入 A 与 B 皆为高电平时, 输出才是高电平; 否则, 输出为低电平。</p>
A	B	Y															
0	0	0															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	1															
2) 或门 逻辑电路	<div><table data-bbox="481 565 736 755"><tr><th>A</th><th>B</th><th>Y</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table><div>(a) 电路图 (b) 真值表</div></div> <div>图 3-49 三极管构成的或门电路</div>	A	B	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	<p>由开关三极管构成的或门逻辑电路如图 3-49 所示。图中, A、B 是输入信号, Y 是输出信号; 其对应关系见图 3-49 (b), 表中, “1” 表示高电平, “0” 表示低电平。</p> <p>从真值表可以看出, 只要输入 A 或 B 有一个为高电平时, 输出就是高电平; 否则, 输出为低电平。</p>
A	B	Y															
0	0	0															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	1															
3) 非门 逻辑电路	<div><table data-bbox="547 990 726 1117"><tr><th>A</th><th>Y</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td></tr></table><div>(a) 电路图 (b) 真值表</div></div> <div>图 3-50 三极管构成的非门电路</div>	A	Y	0	1	1	0	<p>由开关三极管构成的非门逻辑电路如图 3-50 所示。图中, A 是输入信号, Y 是输出信号; 其对应关系见图 3-50 (b), 表中, “1” 表示高电平, “0” 表示低电平。</p> <p>从真值表可以看出, 输入 A 为高电平时, 输出是低电平; 输入为低电平时, 输出为高电平。所以非门又称反相器。</p>									
A	Y																
0	1																
1	0																

2. 与非门和或非门逻辑的图形符号

利用开关三极管, 还可以组成常用逻辑电路与非门与或非门。
与非门和或非门逻辑的图形符号如图 3-51 所示。

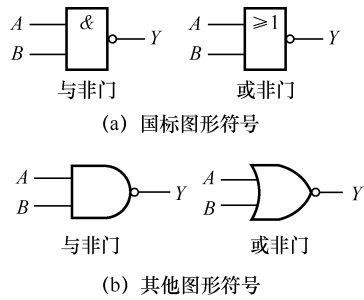
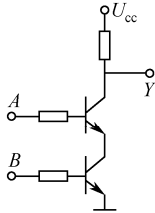
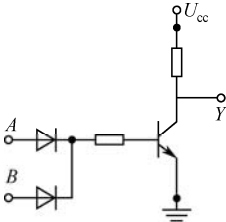


图 3-51 与非门、或非门逻辑的图形符号

与非门逻辑电路	<p>由开关三极管构成的与非门逻辑电路如图 3-52 所示。图中，A、B 是输入信号，Y 是输出信号；其对应关系见图 3-52 (b)，表中，“1”表示高电平，“0”表示低电平。</p> <p>从真值表可以看出，只有输入 A 与 B 皆为高电平时，输出才是低电平；否则，输出为高电平。</p>	<div><p>(a) 电路图</p><table border="1" data-bbox="866 186 1125 376"><thead><tr><th>A</th><th>B</th><th>Y</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></tbody></table><p>(b) 真值表</p></div>	A	B	Y	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
A	B	Y															
0	0	1															
0	1	1															
1	0	1															
1	1	0															
或非门逻辑电路	<p>由开关三极管构成的或非门逻辑电路如图 3-53 所示。图中，A、B 是输入信号，Y 是输出信号；其对应关系见图 3-53 (b)，表中，“1”表示高电平，“0”表示低电平。</p> <p>从真值表可以看出，只有输入 A 或 B 有一个为高电平，输出就是高电平；否则，输出为低电平。</p>	<div><p>(a) 电路图</p><table border="1" data-bbox="893 548 1146 738"><thead><tr><th>A</th><th>B</th><th>Y</th></tr></thead><tbody><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></tbody></table><p>(b) 真值表</p></div>	A	B	Y	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0
A	B	Y															
0	0	1															
0	1	0															
1	0	0															
1	1	0															

3.6.5 三极管振荡电路

1. 多谐振荡电路

多谐振荡电路（又称多谐振荡器、无稳态触发器、矩形波发生器）是一种能够产生矩形波的自激振荡器。它不需要外加触发信号，便能连续地、周期性地产生矩形脉冲。由于脉冲是由基波和很多高次谐波构成的，因此也称为多谐振荡器。

多谐振荡器没有稳定状态，只有两个暂稳态。正常工作时，电路就在这两个暂稳态间不停地自动转换，由此产生矩形波脉冲信号。

1) 电路结构

多谐振荡电路通常由高增益 NPN 管 VT_1 、 VT_2 组成的两级反相器首尾相连而成，级间利用电容 C_1 、 C_2 耦合。三极管多谐振荡电路原理图如图 3-54 所示。图中晶体管多谐振荡器由两级放大器组成，每一级的输出耦合到另一级的输入。 VT_1 、 VT_2 三极管交替导通和截止，产生的都是矩形波输出。所以多谐振荡器的输出可以取自 U_{c1} ，也可以取自 U_{c2} 。

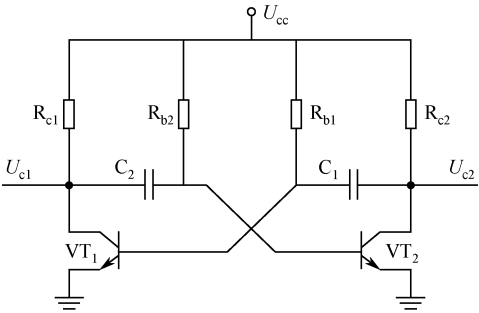


图 3-54 三极管多谐振荡电路原理图

2) 工作原理

(1) 电路开机上电时, 由于电路中两只晶体管不会完全相同, 即使用的是相同型号的晶体管和相同的阻容元件值, 但器件参数总会有所不同。正是电路参数的微小差异和正反馈效应, 使一个三极管(如 VT_1) 迅速饱和导通, 集电极电压(U_{c1}) 接近于零; 另一个三极管(VT_2) 的基极电位瞬间下降到接近于零, 于是 VT_2 可靠截止; 出现一个暂时的“稳态”, 即 VT_1 饱和, VT_2 截止。

(2) 随着 C_2 (经 R_{b2} 到饱和导通的 VT_1 至地) 充电过程的进行, VT_2 因基极电位很快升高而饱和导通, 使 U_{c2} 迅速下降、接近于零, 由于电容 C_1 两端的电压不能突变而是 VT_1 基极电位瞬间接近于零而截至; 两个三极管的状态翻转, 出现第二个暂时“稳态”, 即 VT_2 饱和导通, VT_1 截至。

(3) 随着 C_1 (经 R_{b1} 到 VT_2 至地) 充电, VT_1 基极电位升高, 再次出现一个暂时“稳态”, 即 VT_1 饱和, VT_2 截止。如此反复, 不断循环, 形成了自激振荡。

(4) 振荡周期 T : 如果 T_1 是电容 C_1 的充电时间常数, T_2 为 C_2 的时间常数; 并令 $R_b=R_{b2}=R_{b1}$, $C=C_1=C_2$ 。则有 $T=T_1+T_2=0.7(R_{b1}C_2+R_{b2}C_1)=1.4R_bC$ 。

(5) 振荡频率 F : 振荡器的振荡频率是振荡周期的倒数, 即 $F=1/T \approx 0.7/R_bC$ 。

(6) VT_1 (或 VT_2) 导通时间的长短, 取决于 VT_2 (或 VT_1) 截止的时间, 即取决于 $C_1 \times R_{b1}$ 和 $C_2 \times R_{b2}$ 的时间常数 RC 。时间常数越小, 转换速度越快, 多谐振荡器的输出频率就越高。在图示电路中, 两个 RC 网络的时间常数相同, 两个晶体管的导通和截止时间是相等的。

2. 变压器反馈 LC 振荡电路

变压器反馈 LC 振荡电路如图 3-55 所示。LC 并联谐振电路作为三极管的负载, 反馈线圈 L_2 与电感线圈 L_1 相耦合, 将反馈信号送入三极管的输入回路。换接反馈线圈的两个线头, 可实现负反馈与正反馈的转换。调整反馈线圈的匝数可以改变反馈信号的强弱, 以满足正反馈条件。图中电容 C_b 和 C_e 为耦合电容。绕组 L_1 、 L_3 上的黑点表示变压器绕组的同名端; U_o 为输出电压。

1) 电路构成

变压器耦合 LC 振荡电路有四个组成部分。

(1) 放大电路: 图中共射极放大电路由偏置电阻、三极管 VT 、发射极电阻和工作电源构成, 耦合电容 C_b 有隔直作用。

(2) 选频电路: 图中 L_1 、 C 组成谐振电路, 其数值决定了谐振电路的振荡频率。

(3) 反馈电路: 变压器次级绕组 L_3 与电容 C_b 构成反馈电路, 将输出电压的一部分反馈到输入端, 使振荡器自激。正确连接反馈绕组 L_3 两端的极性, 保证反馈信号为正反馈, 以满足自激振荡的相位条件; 选择反馈绕组 L_3 的匝数以保证足够大的反馈电压, 以满足自激振荡的振幅条件。

(4) 直流电源提供振荡电路的工作电压 U_{cc} , 可随时补充振荡器的能量损耗, 以保持稳定的振荡信号输出。

2) 工作原理

(1) 工作电压接入电路瞬间产生的电扰动经三极管 VT 组成的放大器放大后, 由 L_1C 选

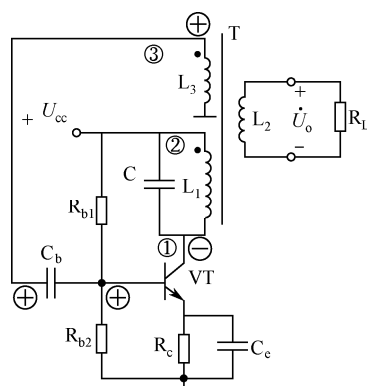


图 3-55 变压器反馈 LC 振荡电路

频回路从众多的频率中选出谐振频率 f_0 ，然后通过线圈 L_1 和 L_3 之间的互感耦合把输出信号按比例反馈至三极管基极。

若基极的瞬间电压极性为正，倒相器集电极瞬时极性为负。从变压器同名端的符号可以看出， L_3 的上端电压极性为负，反馈回基极的电压极性为正，满足相位平衡条件；当三极管 VT 的电流放大系数 β 和 L_1 与 L_3 的匝数比合适，满足振幅条件，就能产生频率 f_0 的振荡信号。

(2) 振荡频率。振荡器的振荡频率等于 L_1C 回路的谐振频率，振荡信号电压通过次级绕组 L_2 输出。改变 L_1C 的参数值，就可以改变振荡器的振荡频率。通常可变电容器被用来选择振荡频率。

(3) LC 振荡电路的特点。变压器反馈式振荡器功率增益高，容易起振；缺点是三极管的电流放大系数 β 随工作频率的增高而急剧降低，所以共振的振动幅度很容易受到振荡频率大小的影响，通常用于固定频率的振荡器。

3.7 三极管的辨识与检测

3.7.1 三极管的辨识

1. 利用万用表辨别引脚与极性

三极管引脚的识别最常用的方法就是用万用表电阻挡进行测量并判别。

判定基极	将万用表置于 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡。先假设某一引脚为基极，然后将黑表笔与基极相连，红表笔先后接到其余两个引脚上，如果两次测得的电阻都很大（或者都很小），而对换表笔后再次测得的两个电阻都很小（或者都很大），则所假设的基极是正确的。
判定发射极和集电极	将万用表置于 $R \times 100$ 或 $R \times 1k$ 挡，对于 PNP 型管，红表笔接基极，黑表笔分别接触另外两个引脚，测得一大一小两个电阻值。电阻值大的为发射极，电阻值小的为集电极。 对于 NPN 型管，黑表笔接基极，红表笔分别接触另外两个引脚，测得两个电阻值。阻值大的为集电极，电阻值小的为发射极。
确定管型	基极确定后，将黑表笔接基极，红表笔分别接其他两极，若测得的两个电阻值都较小，则为 NPN 型管；反之，则为 PNP 型管。

2. 利用型号名称识别材料和类型

国产三极管	根据国产晶体管型号命名法，三极管型号的第二部分用英文字母 A~D 表示晶体管的制造材料。由此可知，三极管型号中第二部分是 A，表示为锗材料 PNP 型三极管；是 B 时，为锗材料 NPN 型管；是 C 时，为硅材料的 PNP 三极管；是 D 时，为硅材料 NPN 型管。
欧洲产三极管	欧洲生产的三极管型号命名中的第一部分用字母 A 和 B 表示晶体管使用的材料。其中，A 表示锗材料，B 表示硅材料。
日本产三极管	日本生产的三极管型号命名中的第三部分用字母 A 和 B 分别表示高频和低频的 PNP 晶体管；用字母 C 和 D 分别表示高频和低频的 NPN 晶体管。

3. 从封装上识别引脚和极性

不同类型、不同型号、不同功能三极管的引脚排列方式与位置也不同，所以可通过阅读

	系数较大；否则，三极管无放大能力或放大能力较差。测量 NPN 管时，将万用表的黑表笔接集电极，红表笔接发射极；在基极与集电极之间并接一只电阻；万用表指针摆动幅度越大，表明三极管的放大能力越强。
反向击穿电压的检测	晶体管的反向击穿电压通常使用晶体管直流参数测试仪（或表）来测量。测量时，先将三极管插入测试孔，按动相应的 V（BR）键，再从表盘中读出反向击穿电压值。
带电阻三极管的检测	带电阻三极管内部含有一至二只电阻器，在检测前应先了解电阻器的阻值。测量时，将万用表置于 $R\times 1k\Omega$ 挡，测量三极管集电极与发射极之间的电阻值（测 NPN 管时，应将黑表笔接集电极，红表笔接发射极；测 PNP 管时将红表笔接集电极，黑表笔接发射极），正常时阻值应为无穷大；如在测量的同时，将晶体管的基极与集电极短路，测得的电阻值应小于 $50k\Omega$ ，否则，晶体管特性已经变坏。

2. 大功率管的检测

<p>（1）利用万用表检测中、小功率三极管的极性、管型及性能的各种方法，基本上也适用与大功率三极管。但由于大功率三极管的工作电流比较大，其 PN 结的面积也较大，其反向饱和电流也必然大，所以在测量时，需使用万用表的 $R\times 10$ 或 $R\times 1$ 挡。</p>
<p>（2）三极管正常时，锗大功率管的集电极与发射极间的电阻值为 $1.5k\Omega$（用 $R\times 10$ 挡测量）以上。硅管集电极与发射极间的电阻值应大于 $100k\Omega$（用 $R\times 10k$ 挡测量），实测值一般为 $500k\Omega$ 以上。</p>

3. 达林顿管的检测

1) 普通达林顿管的检测 用万用表对普通达林顿管进行电极识别、区分 PNP 和 NPN 型、估测放大能力等。	<p>（1）普通达林顿管由两只或多只三极管复合而成，其基极与发射极之间包含多个发射结。检测时可使用万用表的 $R\times 1k$ 或 $R\times 10k$ 挡。</p>
	<p>（2）测量达林顿管各电极之间的正反向电阻值。正常情况下，集电极与基极之间的正向电阻值（测 NPN 管时，黑表笔接基极 B；测 PNP 管时，黑表笔接集电极 C）在 $3\sim 10k\Omega$ 之间，反向电阻值为无穷大。发射极与基极之间的正向电阻值（测 NPN 管时，黑表笔接基极 B；测 PNP 管时，黑表笔接发射极 E）是集电极与基极之间的正向电阻值的 2~3 倍，反向电阻值为无穷大。集电极与发射极之间的正反向电阻值均应接近无穷大。</p>
	<p>（3）如果测得达林顿管三个电极间的正反向电阻值均接近 0，说明该管已击穿损坏；若测得达林顿管的基极与发射极或基极与集电极间的反向电阻值为无穷大，说明该管已开路损坏。</p>
2) 大功率达林顿管的检测 大功率达林顿管比普通达林顿管多了由	<p>（1）测集电结电阻</p> <p>将万用表置于 $R\times 1k$ 或 $R\times 10k$ 挡。管子集电结正常时的正向电阻值较小，一般为 $1\sim 10k\Omega$；反向电阻值应接近无穷大。如果测得集电结的正反向电阻值均很小或皆为无穷大，说明管子已被击穿短路或开路损坏。</p>

续流二极管和泄放电阻组成的保护电路。	<p>(2) 测发射结电阻</p> <p>将万用表置于 $R \times 100$ 挡, 测量发射极与基极之间的正反向电阻值, 正常值均为几百欧姆至几千欧姆。例如, BU932R、MJ10025 等型号大功率达林顿管 B、E 极之间的正反向电阻值均为 600Ω 左右)。如果测得阻值为 0 或无穷大, 则说明被测管已损坏。</p>
	<p>(3) 测集电极与发射极间电阻</p> <p>将万用表置于 $R \times 1k$ 或 $R \times 10k$ 挡, 测量发射极与集电极之间的正反向电阻值。正常时, 正向电阻值应为 $5 \sim 15k\Omega$ (如 BU932R 约为 $7k\Omega$), 反向电阻值应为无穷大; 否则该管的集电极和发射极间已被击穿或开路损坏。</p>

3.8 新型晶体管

3.8.1 数字晶体管

1. 数字晶体管

数字晶体管 (又称电阻晶体管、双极数字晶体管、偏置电阻晶体管, 简称 BRT) 是内部带有电阻的晶体管, 如图 3-56 所示。

由于电阻 R_1 、 R_2 有多种, 类似标准电阻系列配制, 电阻 R_1 与电阻 R_2 可按多种方式搭配, 因此数字晶体管的品种很多。有的仅在基极上串联一只电阻, 一般称为 R_1 ; 有的在基极与发射极之间还并联一只电阻 R_2 。

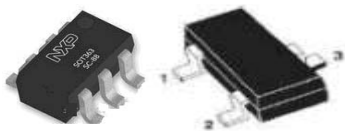


图 3-56 数字晶体管

2. 内部连接

数字晶体管的典型内部连接如图 3-57 所示。前者在普通三极管的基极串联一只电阻 R_1 ; 后者在基极与发射极之间又并接了电阻 R_2 。其等效电路如图 3-58 所示。

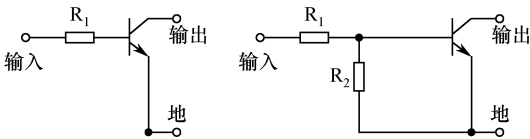


图 3-57 数字晶体管内部连接

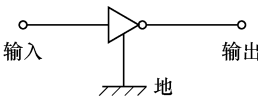


图 3-58 等效电路

3. 特点

(1) 内置偏置电阻。 R_1 的主要作用是限流, 减少输入电流; R_2 主要是用于稳定静态工作点, 并对输入电压进行削减, 防止基极电压过高。
(2) 集成了电阻, 减少元件数量, 缩小了体积, 减少了占用空间。
(3) 薄膜晶体管组成的偏置电阻具有良好的绝缘性能, 可以承受输入的负偏压。
(4) 只需设置开、关条件就可以正常运行, 简化了电路设计。

4. 特性

(1) 内部电路（以 DTA113TKA 为例）：PNP 型数字晶体管的内部连接如图 3-59 所示。

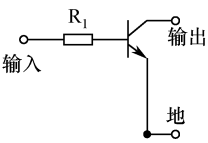


图 3-59 内部连接

(2) 特性曲线：PNP 型数字晶体管的传输特性曲线、输出特性曲线、增益特性曲线分别如图 3-60、图 3-61、图 3-62 所示。这类晶体管主要用于开关电路、接口电路、反相器和驱动器等。

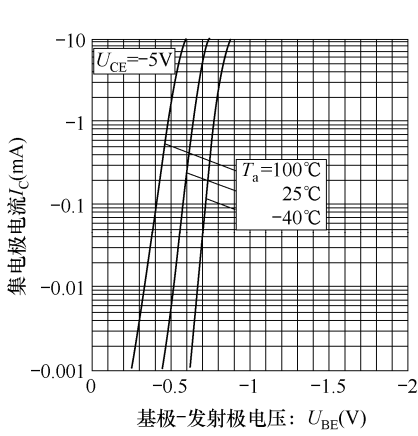


图 3-60 发射极接地时传输特性曲线

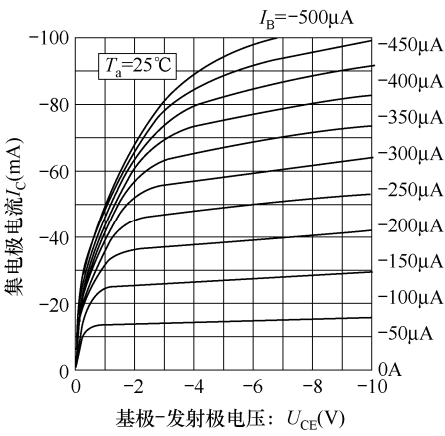


图 3-61 发射极接地时输出特性曲线

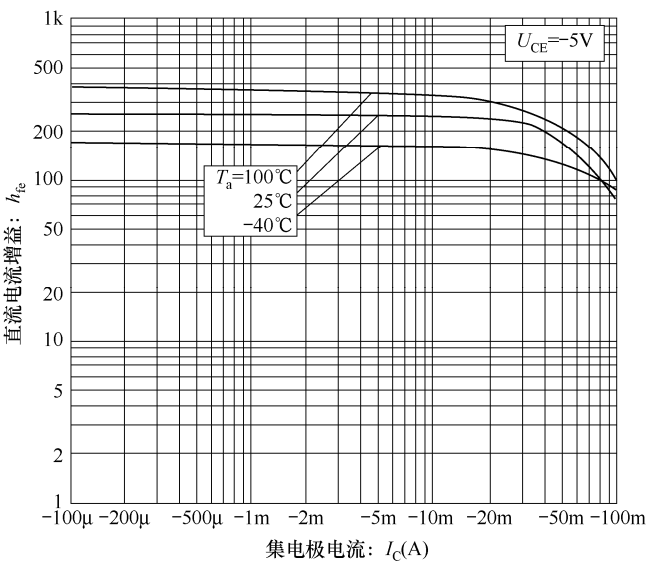


图 3-62 直流电流增益与集电极电流的关系曲线

5. 主要参数（以 EM 系列器件为例）

- （1）集电极与基极间最大电压（ U_{CBO} ）为 50V DC。
- （2）集电极与发射机间最大电压（ U_{CEO} ）为 50V DC。
- （3）集电极电流（ I_C ）为 100mA DC。
- （4）正向输入电压 U_{IN} （fwd）为 40V DC。
- （5）反向输入电压 U_{IN} （rev）为 10V DC。
- （6）功耗（ P_d ）为 200mW。
- （7）直流电流放大系数（ h_{fe} ）为 120。
- （8）工作温度范围是-65~+150℃。

6. DT 系列器件参数

DT 系列器件的主要参数见表 3-17。

表 3-17 DT 系列器件主要参数

型号	U_{CEO} （V）	I_o （mA）	增益 h_{fe}	R_1 （k Ω ）	电阻比（ R_2/R_1 ）
DTDG14GPT100	60	1A	300	13	—
DTDG23YPT100	60	1A	300	2.86	13
DTC113ZUAT106	50	100	33	1.3	12
DTD113ZUT106	50	500	82	1.3	12
DTC114EUAT106	50	100	30	13	1.2
DTC114EUAT106	50	100	30	13	—
DTC114TUAT106	50	100	100	13	—
DTC114WUAT106	50	100	24	13	0.57
DTC124XUAT106	50	50	68	28.6	2.6
DTC143EUAT106	50	100	20	6.11	1.2
DTC143XUAT106	50	100	30	6.11	2.6
DTC143ZUAT106	50	100	80	6.11	12
DTC144EUAT106	50	100	68	61.1	1.2
DTC144GUAT106	50	100	68	61.1	—
DTC144TUAT106	50	100	100	61.1	—
DTC144W11AT106	50	30	56	61.1	0.57

7. 应用

数字晶体管越来越多地应用在 DVD、彩电等多种视频、计算机、通信类数字电子设备及产品中。

- （1）DTC 等系列器件的参数（见表 3-17）。
- （2）DTA 系列器件主要参数。

型号	JEITA 包装	极性	电源电压 V_{CC1} （V）	集电极电流 I_{C1} （A）	输入电阻 R_1 (k Ω)	发射-基极偏置电阻 R_2 （k Ω ）
DTAO24EUB	SC-85	PNP	-50	-0.1	22	22
DTAO43EEB	SC-89	PNP	-50	-0.1	4.7	4.7

续表

型号	JEITA 包装	极性	电源电压 V_{CC1} (V)	集电极电流 I_{C1} (A)	输入电阻 $R_1(k\Omega)$	发射-基极偏置电阻 R_2 (k Ω)
DTAO43EM	SC-105AA	PNP	-50	-0.1	4.7	4.7
DTAO43EUB	SC-85	PNP	-50	-0.1	4.7	4.7
DTAO43TEB	SC-59	PNP	—	—	4.7	—
DTAO43TM	SC-105AA	PNP	—	—	4.7	—
DTAO43TUB	SC-85	PNP	—	—	4.7	—
DTAO43XEB	SC-89	PNP	-50	-0.1	4.7	10
DTAO43XM	SC-105AA	PNP	-50	-0.1	4.7	10
DTAO43XUB	SC-85	PNP	-50	-0.1	4.7	10
DTAO43ZEB	SC-89	PNP	-50	-0.1	4.7	47
DTAO43ZZM	SC-105AA	PNP	-50	-0.1	4.7	47
DTAO43ZUB	SC-85	PNP	-50	-0.1	4.7	47
DTAO44EEB	SC-89	PNP	-50	-0.1	47	47
DTAO44EM	SC-105AA	PNP	-50	-0.1	47	47
DTAO44EUB	SC-85	PNP	-50	-0.1	47	47
DTAO44EB	SC-89	PNP	—	—	47	—
DTAO44TM	SC-105AA	PNP	—	—	47	—
DTAO44TUB	SC-85	PNP	—	—	47	—

8. NPN 型数字晶体管（如 MUN2240、MMUN2240L、MUN5240、DTC144TE、DTC144TM3、NSBC144TF3）

1) 内部电路

NPN 型数字晶体管的内部连接如图 3-63 所示。

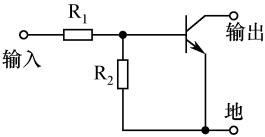


图 3-63 内部电路

2) 特性曲线

NPN 型数字晶体管的三个主要特性曲线分别如图 3-64、图 3-65、图 3-66 所示。从图中可以看出，温度对器件特性有明显影响，温度变化了，特性曲线也会变化。

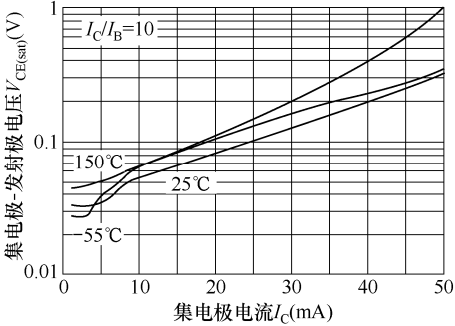


图 3-64 集电极-发射极电压与集电极电流间关系曲线

2) 特性曲线

NPN 型数字晶体管的三个主要特性曲线分别如图 3-64、图 3-65、图 3-66 所示。从图中可以看出, 温度对器件特性有明显影响, 温度变化了, 特性曲线也会变化。

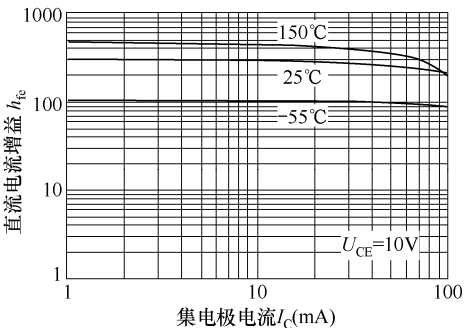


图 3-65 电流增益与集电极电流间关系曲线

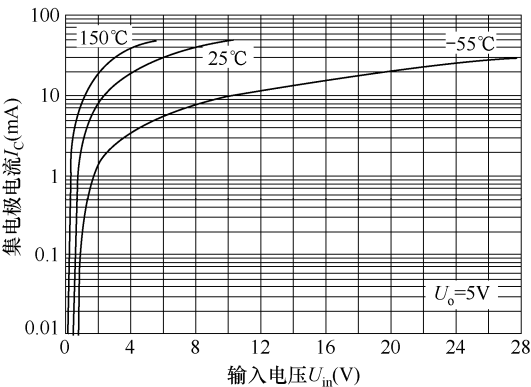


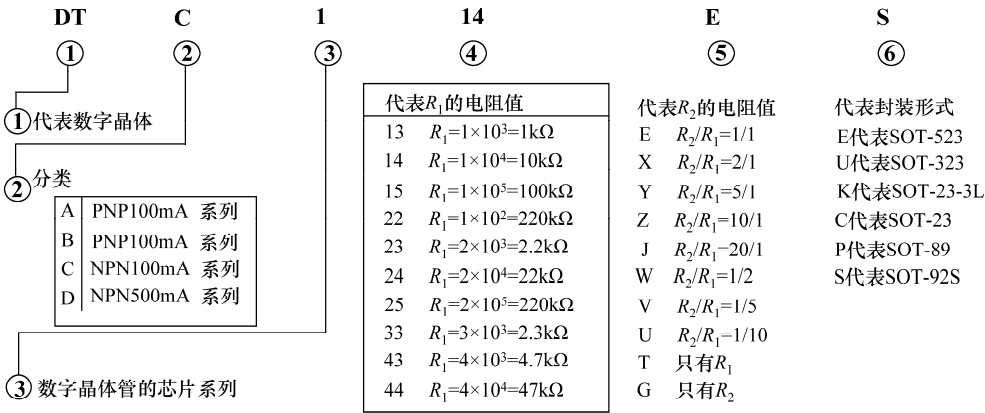
图 3-66 集电极电流与输入电压间的关系曲线

3) 极限参数

- (1) 集电极-基极电压 (U_{CBO}) 为 50V DC。
- (2) 集电极-发射极电压 (U_{CEO}) 为 50V DC。
- (3) 集电极连续电流 (I_C) 为 100mA DC。
- (4) 正向输入电压 U_{IN} (fwd) 为 40V DC。
- (5) 反向输入电压 U_{IN} (rev) 为 6V DC。

9. 数字晶体管的型号命名

数字晶体管的命名方法因生产厂家的不同而变化, 常见数字晶体管的型号命名如下。



3.8.2 异质结双极型晶体管

1. 结构

异质结双极型晶体管有代表性的四种结构是突变发射结结构，缓变发射结结构，缓变发射结、缓变基区结构 I 型和突变发射结、缓变基区结构 II 型。典型的 NPN 台面型 GaAlAs/GaAs 异质结晶体管的结构和杂质剖面如图 3-67 所示。该结构能大幅度减小发射结电容（低发射区浓度）和基区电阻（高基区浓度）。

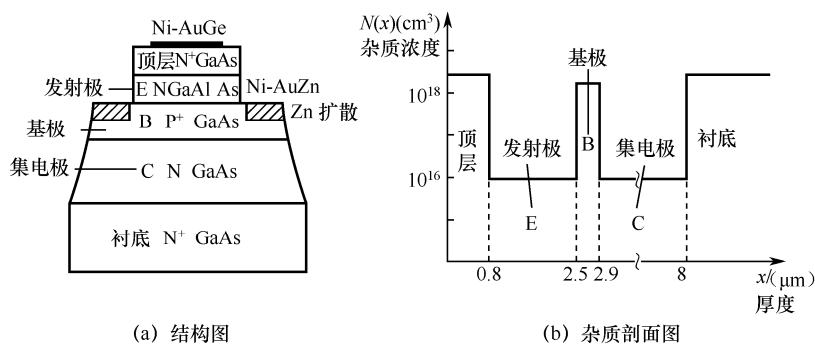


图 3-67 GaAlAs/GaAs 异质结晶体管结构和杂质剖面图

2. 分类

- (1) Si/Ge 异质结双极晶体管。
- (2) GaAlAs/GaAs 异质结晶体管。
- (3) NPN 型 AlGaIn/GaN 异质结双极晶体管等。
- (4) NPN 型 GaAs 宽发射区管、双异质结 NPN 型 GaAs 管、以金属做收集区的 NPN 型 GaAs 和 PNP 型 GaAs 管等。
- (5) NPN 型 InGaAsP / InP 异质结双极晶体管。InGaAsP 具有比 GaAs 更高的电子迁移率，在光纤通信中有重要应用。

3. 特性

异质结双极型晶体管（简称 HBT）的发射区和基区使用不同的半导体材料，发射结（即发射区和基区之间的 PN 结）就成了一个异质结。异质结结构是高频晶体管和光电子器件的关键结构。异质结双极性晶体管具有更好的高频特性和基区发射效率，可以在高达数百 GHz 的信号下工作。

- (1) 异质结的基本特性是界面附近电子和空穴空间分隔的局域化。
- (2) 光强和外加电场能强烈影响 II 型异质结的特性，包括电学、光学、光电特性及其参数。
- (3) I 型异质结中的电子和空穴处在界面的同一侧（窄带材料一侧）。
- (4) II 型异质结中的电子和空穴处在界面的不同侧。
- (5) 在 I 型异质结中载流子复合发生在窄带材料一侧；II 型异质结中载流子复合主要是借助界面的隧道。

(6) 异质结晶体管的基极由能带隙更小的半导体层构成，电子的能量壁垒明显减弱，电子电流显著增大，而空穴电流保持不变，电流放大系数大为提高。

(7) 要减小电流放大系数，只需提高基极的掺杂度，并使基区更薄；降低基极电阻、减小 RC 时间常数，可制造快速晶体管。

4. 特点

(1) 基区可以高掺杂，厚度可以很小，所以基区电阻很小，提高了晶体管的最高振荡频率 f_{\max} 。

(2) 异质结双极型晶体管的增益与基区的电流密度大小关系不大。

(3) 基区电荷对集电 (C) 结电压不敏感，提高了起始 (Early) 电压。

(4) 发射区低掺杂，发射结势垒电容降低，提高了晶体管的特征频率 f_T 。

(5) 可以做成基区组分缓变的器件，则基区中有内建电场，从而载流子渡越基区的时间 τ_B 得以减小。

(6) 开关速度快。

5. 主要电参数

直流参数	(1) 正反向电流增益 BF 和 BR，正反向工作电压 U_{AF} 和 U_{AR}	在管子的正常工作电压与偏压下， $BF=25$ ， $BR=1.9e-2$ ， $U_{AF}=55V$ ， $U_{AR}=38.3V$ 。
	(2) 发射极串联电阻 R_E	集电极开路时，BE 结的 $I-V$ 特性曲线、导通时的曲线斜率为 R_E 。曲线有大电流和小电流两种情况。
	(3) 集电极电阻 R_C	它是模拟晶体管集电区和集电极端子之间的电阻，近似作为常量处理，曲线斜率的倒数即为 R_C 。
	(4) 基极电阻 R_B	R_B 大约为 200Ω 。
	(5) 饱和电流 I_{SM}	在基极-集电极 (BC) 短路时，饱和电流 $I_{SM}=2.46e^{-14}A$ ，实际的 I_C 电流为 $I_C=I_{SM} (BF/(BF+1)) \approx 2.446e^{-14}A$ 。
	(6) 饱和漏电流 I_{SE} 、 I_{SC} 和发射系数 N_F	I_{SE} 是在集电极开路时的饱和漏电流，实际为 $I_{SE}=3.67e^{-14}A$ ； I_{SC} 是在发射极开路时的饱和漏电流，实际为 $I_{SC}=4.25e^{-12}A$ ； N_F 是斜率，实际 $N_F=1.265$ 。
高频参数	(1) 影响器件高频性能的主要参数是发射结电容 C_{JE} 和集电结电容 C_{JC} ，另外也与 R_E 和 R_B 有关，后两个参数随工作点的变化而变化。	
	(2) 特征频率 (f_T) 是晶体管在共发射极状态下、电流增益为 1 时的工作频率，是晶体管具有电流放大能力的最高工作频率。异质结晶体管特征频率约为 15GHz。	
	(3) 最高振荡频率 (f_{\max}) 与特征频率 f_T 成正比，与基区扩展电阻 r_{bb} 、集电结电容 C_{jc} 成反比。	
电 流 增 益 (h_{fe})	一般为 1000。	

击 穿 电 压 (BV)	一般为 120V。
工作温度范 围宽	通常为-269~+350℃。

6. 应用

异质结双极型晶体管主要用作微波晶体管、高速开关管、光电晶体管和制作高速数字电路（I2L）和单片光电集成电路，它在现代的高速电路、射频系统和移动电话中广为应用。

































第 4 章 晶闸管

晶闸管（又称可控硅整流器、可控硅，简称 SCR）是一种大功率半导体器件。它不仅具有单向导电性，而且还具有可控性。它只有导通和关断两种工作状态，可作开关使用。当处于关断状态时，可以承受低反向电流下的高电压；当处于正向导通时，能在低压降下传送大电流。

4.1 基本知识

4.1.1 符号与分类

1. 晶闸管的符号

1) 文字符号	晶闸管的文字符号是 V、VT；也曾使用 SCR，还有用 T 表示的；双向晶闸管多用 VS 表示。																					
2) 图形符号	<div><div><p>(a) 国标符号</p></div><div><p>(b) 其他符号</p></div></div> <p>图 4-1 图形符号</p> <p>表 4-1 其他类型晶闸管常用符号</p> <table><tr><td></td><td>反向阻断二极晶闸管</td></tr><tr><td></td><td>反向导通二极晶闸管</td></tr><tr><td></td><td>双向二极晶闸管</td></tr><tr><td></td><td>三极晶闸管</td></tr><tr><td></td><td>反向阻断晶闸管（N 型门极）</td></tr><tr><td></td><td>反向阻断晶闸管（P 型门极）</td></tr><tr><td></td><td>门极关断晶闸管</td></tr><tr><td></td><td>双向晶闸管</td></tr><tr><td></td><td>逆导晶闸管</td></tr><tr><td></td><td>光控晶闸管</td></tr></table>			反向阻断二极晶闸管		反向导通二极晶闸管		双向二极晶闸管		三极晶闸管		反向阻断晶闸管（N 型门极）		反向阻断晶闸管（P 型门极）		门极关断晶闸管		双向晶闸管		逆导晶闸管		光控晶闸管
		反向阻断二极晶闸管																				
		反向导通二极晶闸管																				
	双向二极晶闸管																					
	三极晶闸管																					
	反向阻断晶闸管（N 型门极）																					
	反向阻断晶闸管（P 型门极）																					
	门极关断晶闸管																					
	双向晶闸管																					
	逆导晶闸管																					
	光控晶闸管																					

2. 常见晶闸管（见图 4-2）



图 4-2 晶闸管外形

3. 晶闸管的分类

1) 按关断、导通及控制方式

晶闸管可分为普通晶闸管、双向晶闸管、逆导晶闸管、门极关断晶闸管（GTO）、BTG 晶闸管、温控晶闸管和光控晶闸管等多种。

2) 按封装形式

晶闸管主要分为金属封装晶闸管、塑封晶闸管和陶瓷封装晶闸管三种类型。其中，金属封装晶闸管又分为螺栓形、平板形、圆壳形等多种；塑封晶闸管又分为带散热片型和不带散热片型两种。

3) 按容量

晶闸管可分为大功率晶闸管、中功率晶闸管和小功率晶闸管三种。通常，大功率晶闸管多采用金属壳封装，而中、小功率晶闸管则多采用塑封或陶瓷封装。

4) 按关断速度

晶闸管可分为普通晶闸管和快速（即高频）晶闸管。

5) 按引脚和极性分类

晶闸管按其引脚和极性可分为二极晶闸管、三极晶闸管和四极晶闸管。

4. 特点

晶闸管具有小功率控制大功率、功率放大系数很高、反应极快、无触点运行、无火花、无噪声、效率高、成本低等特点。能在高电压、大电流条件下工作，且工作过程可以控制。

5. 应用

晶闸管被广泛应用于可控整流、交流调压、中频电源、无触点开关、逆变器、变频器、高压输电等领域。

4.1.2 结构与工作原理

1. 结构

晶闸管是 PNP 四层三端器件，有三个 PN 结，可分别表示为 J_1 、 J_2 、 J_3 ，如图 4-3（a）所示。中间的 N、P 两层可以视为两部分，其结构犹如一个 PNP 管和一个 NPN 管互相连接而成，如图 4-3（b）所示。图中，一个晶体管的集电极同时又是另一个晶体管的基极。这种结构形成了内部的正反馈关系，其等效电路如图 4-3（c）所示。

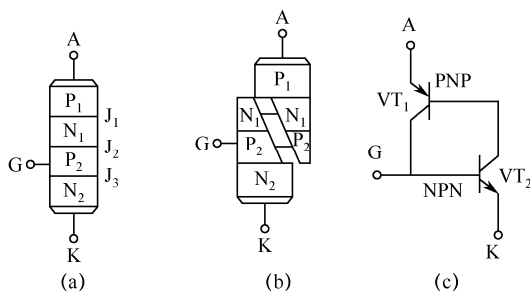


图 4-3 晶闸管结构示意图及等效电路

2. 工作原理

1) 电路连接	<p>晶闸管在工作时，阳极 A 和阴极 K 分别与电源和负载相连，组成晶闸管的主电路；晶闸管的门极 G（或控制极）和阴极 K 与晶闸管的触发电路相连接，组成晶闸管的控制电路，如图 4-4 所示。</p> <p>图 4-4 晶闸管工作原理示意图</p>
2) 工作状态 晶闸管的工作原 理主要体现在它 的工作状态及其相 互转换过程。	<p>(1) 正向阻断状态</p> <p>当晶闸管承受正向电压、门极无电压的情况下（即 $I_g=0$），晶闸管中只流过很小的漏电流，晶闸管的这种状态称为正向阻断状态。</p> <p>(2) 反向阻断状态</p> <p>当晶闸管的阳极和阴极之间加反向电压时，晶闸管中也只流过很小的漏电流，晶闸管的这种状态称为反向阻断状态。</p> <p>(3) 导通状态</p> <p>晶闸管导通后，即使去掉门极电流 I_g（即 $I_g=0$），晶闸管仍能保持原来的阳极电流 I_A 而继续导通，此时，门极失去控制作用。</p>
3) 状态转换	<p>(1) 由正向阻断转为导通</p> <p>晶闸管加正向电压、门极也加足够的正向电压时，则有电流 I_g 从门极流入 NPN 管的基极。NPN 管导通后，其集电极电流 I_{c2} 流入 PNP 管的基极，并使其导通；PNP 管的集电极电流 I_{c1} 又流入 NPN 管的基极，这种正反馈作用使晶闸管迅速饱和导通，完成了晶闸管由正向阻断状态到饱和导通状态的转变。此时，晶闸管的阳极电流 I_A 完全由主回路 E_A 的电压和回路电阻 R 决定。为保证晶闸管（或双向晶闸管）由正向阻断状态确实转为导通，必须使门极电流 $\geq I_{GT}$，并将此电流值保持至负载电流达到 $\geq I_H$（维持电流）；而且要按可能遇到的最低温度考虑。</p>

3) 状态转换	<p>(2) 由导通转为阻断</p> <p>晶闸管由导通转为阻断通常有两种方法：一种是在晶闸管导通后，不断地减小阳极电压或增大回路电阻，使阳极电流 I_A 降低到维持电流以下，并保持足够长的时间，以确保回复至截止状态；即使在可能的最高运行温度下也必须满足上述条件。另一种是晶闸管导通后，在阳极与阴极间施加足够的反向电压，晶闸管同样会转变为阻断状态。</p>
	<p>(3) 维持晶闸管导通</p> <p>要维持晶闸管的导通状态，就要保证阳极电位高于阴极电位、阳极电流大于维持电流，两者缺一不可。为了长期可靠工作，应保证结温、壳温不高于允许值，即使运行在可能的最高环境温度也应如此。</p>
4) 防止误导通	<p>(1) 门极连线长度要尽量降至最短，返回线直接连至阴极，以减少杂波吸收。所用连线需是双绞线或屏蔽线。门极和阴极间加接阻值为 $1k\Omega$ 或更小的电阻和高频旁路电容。选用低灵敏度晶闸管也是值得考虑的办法。</p>
	<p>(2) 为避免 du/dt 可能引起的无触发，可加入 RC 缓冲电路。</p>
	<p>(3) 为避免 di/dt 引起问题，可加接几毫亨的电感和负载串联。</p>

4.1.3 特性与参数

1. 晶闸管特性

晶闸管阳极 A 与阴极 K 之间的电压与晶闸管阳极电流之间关系称为晶闸管的伏安特性，晶闸管的伏安特性曲线如图 4-5 所示。正向特性位于第一象限，反向特性位于第三象限。

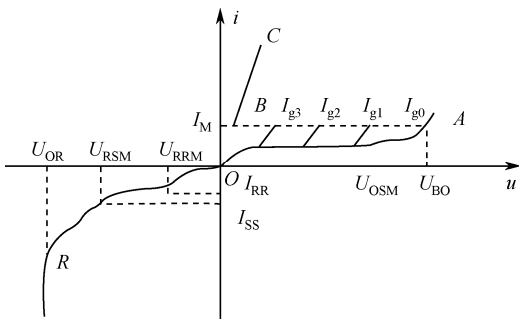


图 4-5 晶闸管伏安特性曲线

1) 反向特性

当门极 G 开路、阳极加上反向电压时，晶闸管中只有很小的反向漏电流；当反向电压进一步提高到雪崩击穿电压后，反向电流迅速增加，如图 4-5 的特性曲线 OR 段所示。

当反向电压达到 U_{OR} 时，曲线开始弯曲。弯曲处 R 对应的电压 U_{OR} 称为反向转折电压。图 4-5 特性曲线 OR 段的 R 点对应的电压就是 U_{OR} 。当反向电压超过反向转折电压后，晶闸管就会发生永久性反向击穿而损坏。

2) 正向特性

当门极 G 开路、阳极 A 与阴极 K 间加上正向电压时，晶闸管中只有很小的正向漏电流流过，此时晶

闸管处于正向阻断状态。当阳极-阴极间的电压增大到一定数值后，晶闸管导通。使晶闸管从阻断转换为导通的电压 U_{BO} 称为正向转折电压。图 4-5 特性曲线 OA 段的 A 点对应的电压就是 U_{BO} 。
3) 负阻特性 当正向电压高于正向转折电压 U_{BO} 时，会发生雪崩击穿，产生雪崩倍增效应。只要电流稍有增加，电压便迅速下降，呈现负阻特性，如图 4-5 中的虚线 AB 段所示。这时 J_1 、 J_2 、 J_3 三个结均处于正偏，晶闸管便进入正向导电状态，即通态。
4) 导通后的伏安特性 晶闸管正向导通后的伏安特性与普通 PN 结的正向特性相似，如图 4-5 的 BC 段所示。

2. 主要参数

1) 电压参数	(1) 断态不重复峰值电压 (U_{DSM})	是指晶闸管在门极开路时，施加于晶闸管的正向阳极电压上升到正向伏安特性曲线转折处所对应的电压值。它是每次持续时间不大于 10ms 的断态最大脉冲电压，并且不能重复。
	(2) 断态重复峰值电压 (U_{DRM})	是指晶闸管在门极开路及额定结温下，允许每秒 50 次、每次持续时间不大于 10ms，重复施加于晶闸管上而不损坏晶闸管的正向断态最大脉冲电压。
	(3) 反向不重复峰值电压 (U_{RSM})	是在晶闸管门极开路情况下，阳极施加反向电压并对应于反向伏安特性曲线急剧转折处的反向峰值电压值。它是一个不能重复施加且持续时间不大于 10ms 的最大反向脉冲电压。
	(4) 反向重复峰值电压 (U_{RRM})	是指晶闸管门极开路且在额定结温下，允许每秒 50 次、每次持续时间不大于 10ms、重复施加于晶闸管上而不损坏晶闸管的反向最大脉冲电压。
	(5) 额定电压 (U_m)	是指将断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向重复峰值电压 U_{RRM} 中数值较小的一个取整后的数值。
2) 电流参数	(1) 额定正向平均电流 (I_F)	在环境温度小于 40℃ 和标准散热条件下，允许连续通过晶闸管阳极的工频正弦半波电流的平均值。
	(2) 维持电流 (I_H)	在控制极开路和规定的环境温度下，晶闸管维持导通所需的最小阳极电流。
	(3) 断态重复峰值电流 (I_{DRM})	在额定结温和门极开路情况下，对应于断态重复峰值电压下的峰值电流。
	(4) 反向重复峰值电流 (I_{RRM})	在额定结温和门极开路情况下，对应于反向重复峰值电压下的峰值电流。
3) 门极参数	(1) 门极触发电压 (U_{gt})	在规定的环境温度和正向电压下，使晶闸管从阻断状态转变为导通状态所需要的最小门极直流电压。
	(2) 门极触发电流 (I_{gt})	在规定的环境温度和正向电压下，使晶闸管从阻断状态转变为导通状态所需要的最小门极直流电流。
4) 动态参数	(1) 断态电压临界上升率 (du/dt)	在额定结温和门极开路条件下，使晶闸管保持断态所能承受的最大电压上升率。
	(2) 通态电流临界上升率 (di/dt)	在规定条件下，晶闸管用门极触发信号开通时，晶闸管所能承受而不会导致损坏的通态电流的最大上升率。

4) 动态参数	(3) 门极控制开通时间 (t_{on})	在规定的门极触发信号作用下, 使晶闸管从断态变成通态的过程中, 从门极触发脉冲前沿的 10%到阳极电压下降至 10%的时间间隔。
5)晶闸管其他参数符号	(1) 其他电流参数符号	I_T (AV) ——通态平均电流 I_F (AV) ——正向平均电流 I_{DRM} ——断态重复峰值电流 I_{TSM} ——通态一个周波不重复浪涌电流 I_{GT} ——门极触发电流 I_{RM} ——反向峰值电流 I_{RR} ——晶闸管反向重复平均电流 I_{DR} ——晶闸管断态平均重复电流 I_{RRM} ——反向重复峰值电流 I_{RSM} ——反向不重复峰值电流 (反向浪涌电流)
	(2) 其他电压参数符号	U_{TM} ——通态峰值电压 U_{GT} ——门极触发电压 U_{ISO} ——模块绝缘电压
	(3) 其他功率参数符号	P_d ——耗散功率 P_G ——门极平均功率 P_{GM} ——门极峰值功率
	(4) 热阻及结温参数符号	R_{thjc} ——结壳热阻 T_{jm} ——额定结温

4.1.4 串并联及保护

对于大型整流装置, 单个晶闸管的电压和电流定额往往不能满足需要。特别是在高电压和大电流场合, 必须把晶闸管串联或并联起来使用。但是由于每个元件静态和动态参数不尽相同, 简单地进行串并联会导致元件容易损坏, 所以必须对其采取相应的保护措施。

1. 晶闸管串联保护

当晶闸管的额定电压低于实际需要时, 可将晶闸管串联起来使用, 但这又增加了发生故障的可能性。

1) 串联晶闸管故障原因	(1) 各串联元件中流过的漏电流相同, 但因静态伏安特性具有分散性, 各晶闸管的分压会不相等。其中, 承受高电压的元件首先达到转折电压而导通, 使另一个元件承担全部电压而可能被击穿, 失去控制作用。
	(2) 电网存在电压谐波也很容易引起晶闸管因 du/dt 瞬时过高而损坏。
	(3) 串联的多只晶闸管参数差异而致开通与关断不同步, 致使先导通、后关断的晶闸管因过压而损坏。
2) 保护措施	(1) 尽可能选择静态特性一致的元件。

<p>2) 保护措施</p>	<p>(2) 为保证各个晶闸管所承受的电压相等,即均压,需要并联均压电阻 R_j。均压电阻 R_j 远远小于其阻断电阻,如图 4-6 所示。均压电阻参数可依据下式确定:$R_j=U_j/I_j$; $P_j=1.2I_j^2R_j$。</p> <p>式中, R_j 为并联在每只晶闸管两端的电阻值; U_j 为每只晶闸管上所承受的电压值; I_j 为 10 倍的晶闸管漏电流; 1.2 是系数; P_j 为并联在每组晶闸管两端的电阻的额定功率。</p> <div data-bbox="563 357 816 599"></div> <p>图 4-6 动态均压保护措施</p> <p>(3) 动态均压。由于材料、工艺等原因,晶闸管结电容的大小、元件的触发特性、导通和关断特性多有差异,这都会影响晶闸管的正常工作。为提高工作的可靠性和实用性,可在保护电路上并联 RC 阻容电路进行动态均压保护,如图 4-6 所示。</p>
----------------	--

2. 晶闸管并联保护

<p>1) 均流</p>	<p>当实用电路中有大电流流过时,可以采用多个晶闸管并联连接,共同承担较大的电流。并联后,因各元件的静态和动态特性参数的差异而出现电流分配不均的情况,甚至导致晶闸管的损坏。因此需要采取相应的保护措施,主要是解决均流问题。</p>
<p>2) 保护措施</p> <p>电路中串联均流电阻的保护方法由于损耗较大,只适用于小电流、小功率的场合。</p>	<p>(1) 挑选特性参数尽量一致的晶闸管元件。</p> <p>(2) 触发电路的触发特性尽量保持一致。</p> <p>(3) 串接均流电阻 R。实用电路如图 4-7 所示。</p> <div data-bbox="623 1170 840 1355"></div> <p>图 4-7 并联均流电阻电路</p> <p>(4) 动态均流。当晶闸管中流过脉冲电流时,一般采用电感均流,具体电路如图 4-8 所示。由于电感是储能元件,电路损耗很小,适合大容量晶闸管的并联保护。</p> <div data-bbox="599 1527 864 1711"></div> <p>图 4-8 动态均流保护电路</p>

4.1.5 晶闸管模块

晶闸管模块就是把两个或两个以上的晶闸管芯片按一定电路连接并密封在一个绝缘的外壳内，且管芯与导热底板彼此绝缘。

1. 常见晶闸管模块（见图 4-9）



图 4-9 晶闸管模块

目前晶闸管模块主要有普通模块和智能模块两类。普通模块主要是主电路的集成；智能模块不仅集成了主电路，还集成了触发电路、保护电路，有的还包括传感器件等。

2. 普通模块

常见晶闸管普通模块有臂对模块、单相桥模块和三相桥模块等，型号主要有 MFA、MFC、MTC、MTK、MTA、MTX 等几种。

1) 模块内部电路 常见普通晶闸管模块的内部电路主要有四种，如图 4-10 所示。	<table><tr><th>型号</th><th>MTC</th><th>MTK</th><th>MTA</th><th>MTX</th></tr><tr><td>电路图</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>	型号	MTC	MTK	MTA	MTX	电路图				
	型号	MTC	MTK	MTA	MTX						
电路图											
图 4-10 普通晶闸管模块型号及内部电路											
2) 常用模块参数	常用普通晶闸管模块主要参数见表 4-2。										
3) 模块的输出特性 普通晶闸管模块的控制电压与控制角 α 的关系因负载性质和电路形式的不同而不同。	(1) 单相整流调压模块用于阻性负载时， α 的有效范围为 $0\sim180^\circ$ ，对应的控制电压为 $0.5\sim9.5\text{V}$ ；用于感性负载时， α 的范围为 $0\sim90^\circ$ ，对应的控制电压为 $0.5\sim9.5\text{V}$ 。										
	(2) 三相全控桥整流调压模块用于阻性负载时， α 的有效范围为 $0\sim120^\circ$ ，对应的控制电压为 $2\sim8\text{V}$ ；感性负载时， α 的范围为 $0\sim90^\circ$ ，对应的控制电压为 $3.5\sim8\text{V}$ 。										
	(3) 三相半控桥整流调压模块用于阻性负载时， α 的有效范围为 $0\sim180^\circ$ ，对应的控制电压为 $0.5\sim9.5\text{V}$ 。										
	(4) 单相交流调压模块用于阻性负载时， α 的有效范围为 $0\sim180^\circ$ ，对应的控制电压为 $0.5\sim9.5\text{V}$ 。三相全控桥交流调压模块用于阻性负载时， α 的有效范围为 $0\sim150^\circ$ ，对应的控制电压为 $1.5\sim9\text{V}$ 。										

	(5) 三相半控桥交流调压模块用于阻性负载时, α 的有效范围为 $0\sim 210^\circ$, 对应的控制电压为 $0.5\sim 9.5\text{V}$ 。
	(6) 三相整流充放电模块逆变放电时, α 的有效范围为 $90^\circ\sim 180^\circ$, 对应的控制电压为 $0.5\sim 5\text{V}$ 。
	(7) 整流充电时, α 的有效范围为 $0\sim 90^\circ$, 对应的控制电压为 $5\sim 9.5\text{V}$ 。
	(8) 交流调压模块带感性负载时, α 应大于负载阻抗角 Ψ , 即 $\alpha\geq\Psi$; 当 $\alpha<\Psi$ 时, 模块已输出最大电压, 不随 α 的改变而变化。
4) 模块保护	<p>实用电路中产生的过电压容易造成模块击穿。正常工作时发生的超过晶闸管承受能力的最高峰值电压和尖峰脉冲等统称为过电压。产生过电压的外部原因主要是雷击、电网电压剧烈波动或干扰; 内部原因主要是电路状态发生变化时积累的电磁能量不能及时释放。</p> <p>过电压极易造成模块损坏, 必须采取必要的限压保护措施, 把晶闸管承受的过电压限制在正反向不重复峰值电压以内。</p> <p>常用的保护措施除过电压保护外, 还有过电流保护、电压及电流上升率的保护和过热保护等。</p>

表 4-2 常用普通晶闸管模块主要参数

系列与型号		$I_{\text{T(AV)}}$	$I_{\text{T(RMS)}}$	U_{DRM}	I_{DRM}	U_{TM}	I_{TM}	du/dt	di/dt	I_{TSM}	I_{GT}	U_{GT}	I_{H}	U_{ISO} (V)
		$I_{\text{F(AV)}}$	$I_{\text{F(RMS)}}$	U_{RRM}	I_{RRM}	U_{FM}	I_{FM}	(V/ μs)	(A/ μs)	I_{FSM}	(mA)	(V)	(mA)	
MT、MF	110	110	170	600~3000	12	1.8	330	≥ 200	≥ 100	1.7	100	2.0	20~150	2500 3000 3600
	135	135	210		15	1.9	410			2.1	100	2.5		
	160	160	250		20	1.9	480			2.5	150	2.5		
	200	200	310		20	2.0	600			3.1	150	2.5		
	250	250	390		20	2.0	750			3.9	150	2.5		
	300	300	470		20	2.0	900			4.7	150	2.5		
	500	500	780		30	2.2	1500			7.8	200	3.0		
	800	800	1250		30	2.2	2400			12.5	200	3.0		

注: MT、MF 主要是指 MTC、MTA、MTK、MTX、MFC、MFA、MFK、MFX。

3. 智能模块

由于以 MOS 结构为基础的半导体器件采用电压控制, 驱动功率小, 控制简单。所以可将 IGBT、MOSFET、MOS 控制晶闸管 (MCT)、MOC 控制整流管 (MCD) 等器件芯片与控制电路、驱动电路、保护电路、连线及自诊断电路等组合在一起、并密封在同一绝缘外壳内的智能化模块 (即 IPM) 也应运而生。在 IPM 的基础上, 将逆变器电路 (IC) 的所有器件都集成封装在一个模块内, 成为专用电力模块 (即 ASPM)。这种模块可按应用电路的不同而进行二次设计, 灵活、方便。但要把电平为几伏、电流为几毫安的集成电路与几百安、几千伏的电力半导体器件集成在同一芯片上需要解决一系列的技术问题。

晶闸管智能模块是把晶闸管主电路、控制与触发电路、反馈电路、保护电路及其连线集成、封装为一体的系统模块, 有的甚至集成了各种传感器件和其他功能部件。

智能模块能直接完成交流调压、全控整流、稳流稳压等各种功能，并且具备各种保护能力。在变压调压、加热调温、电镀、电解、电池充放电、调光、电源稳压、电机励磁、直流电机调速、交流电机调速及软启动等领域广泛应用。

(1) 三相交流模块：由六只晶闸管及其移相调控器等组成，两只晶闸管为一组，采取反并联连接，如图 4-11 所示。

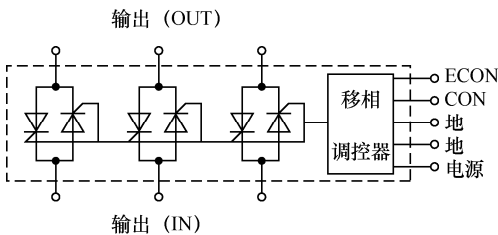


图 4-11 三相交流模块的内部连接

(2) 三相可控整流模块（见图 4-12）

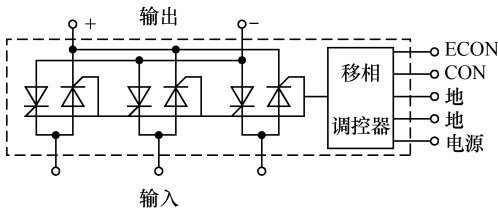


图 4-12 三相可控整流模块内部连接

(3) 单相交流模块（见图 4-13）

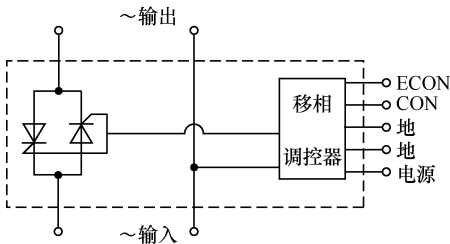


图 4-13 单相交流模块内部连接

(4) 单相可控整流模块（见图 4-14）

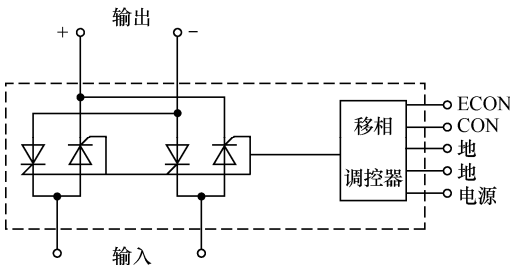


图 4-14 单相可控整流模块内部连接

1) 模块内部连接
模块功能不同，内部连接也不同。常见智能模块的内部连接如图 4-11 所示。图中，IN 为主电路输入端，OUT 为主电路输出端；CON 为调控器控制信号；ECON 为测试端，一般不用；电源端，一般接 12V 电源。

<div data-bbox="81 755 211 784" data-label="Section-Header"><p>2) 模块型号</p></div> <div data-bbox="57 797 268 952" data-label="Text"><p>目前晶闸管模块型号尚不统一，命名法也不尽相同。现介绍两种型号命名法。</p></div>	<div data-bbox="340 161 765 190" data-label="Text"><p>(1) 型号由六部分构成，如图 4-15 所示。</p></div> <div data-bbox="561 211 876 312" data-label="Diagram"></div> <div data-bbox="599 340 839 369" data-label="Caption"><p>图 4-15 模块型号构成</p></div> <div data-bbox="340 394 635 422" data-label="Text"><p>图中各部分的具体含义如下：</p></div> <div data-bbox="340 436 1143 757" data-label="List-Group"><ul style="list-style-type: none">①—为数字 3 或空白，3 表示三相，空白表示单相。②—为字母 MT，晶闸管智能模块系列代号。③—为字母组合 AC 或 DC。AC 表示交流调压，DC 表示整流调压。④—为数字。标记模块的最大电流，即模块全导通时的电流。⑤—为字母 A、V、M、R 等。字母的具体含义是：V 表示稳压类产品，A 表示稳流产品，M 表示机电控制产品，R 表示逆变产品。⑥—为字母 T 或 C。其具体含义是：T 表示具有过热保护功能，C 表示具有过流保护功能。</div> <div data-bbox="294 771 1143 885" data-label="Text"><p>例如，模块型号为 MTAC150，表明这是单相交流模块，最大有效值电流 150A。型号为 3MTDC200，表明是三相整流模块，最大平均电流 200A。型号为 MTDC100VT，表示单相整流稳压模块，最大平均电流 100A，具备过热保护功能。</p></div> <div data-bbox="340 900 776 929" data-label="Text"><p>(2) 型号由 11 部分组成，如图 4-16 所示。</p></div> <div data-bbox="302 942 1124 1496" data-label="Diagram"></div> <div data-bbox="587 1517 851 1546" data-label="Caption"><p>图 4-16 模块型号的构成</p></div>
<div data-bbox="81 1650 268 1719" data-label="Section-Header"><p>3) 智能模块主要参数</p></div>	<div data-bbox="340 1568 1143 1803" data-label="List-Group"><ul style="list-style-type: none">(1) 工作频率：通常为工频 50Hz。(2) 输入电压范围：模块的额定电压为 220V AC 时，输入电压范围为 170～250V AC；额定电压为 380V AC 时，输入电压范围为 300～450V AC。(3) 电压不对称度：三相交流输出电压不对称度<6%（只适用三相模块）。(4) 控制电源电压：控制电源电压一般为 12V DC（部分模块需要+24V 或 ±12V）。</div>

3) 智能模块主要参数	<p>(5) 控制信号电压：控制电压 U_{CON} 通常为 $0\sim 5\text{V}$ 或 $0\sim 10\text{V DC}$。</p> <p>(6) 控制信号电流：控制信号电流一般为 $4\sim 20\text{mA}$ 或 $0\sim 10\text{mA}$；但也有模块的控制信号电流 $I_{\text{CON}}\leq 1\text{mA}$。</p> <p>(7) 输出电压温度系数 $<600\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$。</p> <p>(8) 模块绝缘电压 $U_{\text{ISO}}(\text{RMS})\geq 2500\text{V AC}$。</p>
4) 常见模块型号及其参数	(1) 智能三相整流模块型号及其参数（见表 4-3）。
	(2) 智能单相交流模块型号及主要参数。 MJYD-JL-800：800A 450V；MJYD-JL-600：600A 450V； MJYD-JL-450：450A 450V；MJYD-JL-300：300A 450V。
	(3) 智能单相整流模块型号及主要参数。 MJYD-ZL-400：400A 450V；MJYD-ZL-320：320A 450V； MJYD-ZL-200：200A 450V；MJYD-ZL-150：150A 450V； MJYD-ZL-100：100A 450V；MJYD-ZL-55：55A 450V。

表 4-3 智能三相整流模块型号及其参数

参数名称 参数值 模块型号		最高输出电压	每相最大输入电流	最大输出电流	结壳热阻	工作壳温
		$U_{\text{T}}(\text{AV})$ 或 $U_{\text{T}}(\text{RMS})$	$I_{\text{IN}}(\text{RMS})$	$I_{\text{T}}(\text{AV})$ 或 $I_{\text{T}}(\text{RMS})$	R_{JC}	T_{C}
		V	A	A	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	$^{\circ}\text{C}$
三相 整流	MJYS-QKZL-2000	$1.35U_{\text{IN}}$	1600	2000	0.03	≤ 80
	MJYS-QKZL-750		610	750	0.04	
	MJYS-QKZL-500		410	500	0.04	
	MJYS-QKZL-400		320	400	0.05	
	MJYS-QKZL-320		260	320	0.06	
	MJYS-QKZL-260		200	260	0.08	
	MJYS-QKZL-200		160	200	0.15	

4.1.6 晶闸管保护

晶闸管的型号越来越多，应用也越来越广。但晶闸管对过电压、过电流等因素很敏感，容易出故障，甚至造成损坏。为保障晶闸管正常工作，通常需要采用多种保护措施。

1. 过电压保护

晶闸管承受过电压的能力较差，必须采用过电压保护措施以抑制晶闸管上可能出现的过电压。

1) 过电压的产生	过电压产生的主要原因是供给的电功率或系统储能发生激烈的变化，使系统来不及转换，或者系统中原来积聚的电磁能量来不及释放造成的，如遭雷击、系统断路等。
2) 过电压类型	<p>过电压主要分为外来冲击引起的过电压和内部开关开闭引起的冲击电压两种类型。</p> <p>(1) 雷击过电压：外来冲击引起的过电压主要是由雷击产生的过电压和高压断路器动作产生的过电压。这类过电压都是几微秒至几毫秒的电压尖峰脉冲。</p> <p>(2) 操作过电压：电路内开关的打开、闭合引起的过电压主要指交流电源接通、断开产生的过电压，直流侧产生的过电压和换相冲击电压等。</p>

3) 过电压危害	<p>(1) 当施加的正向电压超过其断态重复峰值电压 (U_{DRM}) 一定值后, 晶闸管就会因过电压而误导通, 引发电路故障。当元件承受的反向电压超过其反向击穿电压时, 即使时间很短, 也会造成元件反向击穿损坏。</p> <p>(2) 当外加反向电压超过其反向重复峰值电压 (U_{RRM}) 一定值后, 晶闸管会因过电压而损坏。如果正向电压超过晶闸管的正向转折电压, 会引起晶闸管硬开通, 它不仅使电路工作失常, 且多次硬开通后元件正向转折电压会降低, 甚至失去正向阻断能力而损坏。</p>
4) 过电压防护	<p>由于过电压的成因不同, 需要采取的抑制措施也不同。减少过电压源, 并使过电压幅值衰减; 抑制过电压的上升速率, 延缓已产生能量的释放速度; 增加释放途径; 采用电子线路进行保护等都是很好的思路和方法。目前最常用的办法是在回路中接入吸收能量的元件, 使能量得以消散, 通常称为吸收回路或缓冲电路。</p> <p>(1) 阻容吸收: 晶闸管从导通到阻断时, 线路电感 (主要是接触器线圈、变压器漏感等) 释放的能量会产生过电压。即使同元件串联的电感很小, 电感产生的感应电势值仍很大, 这个电势和电源电压串联, 反向加在已恢复阻断的元件上, 可能导致晶闸管的反向击穿。这种由于晶闸管关断引起的过电压, 称为关断过电压, 其数值可达工作电压峰值的 5~6 倍, 所以必须采取抑制措施。</p> <p>阻容吸收电路中电容器将产生过电压的电磁能量变成静电能量储存起来, 串接的阻尼电阻可防止电容和电感产生谐振、限制晶闸管开通损耗和电流上升率。这种吸收回路能有效抑制晶闸管由导通到截止时产生的关断过电压。阻容吸收回路可接在电路的交流侧、直流侧, 或并接在晶闸管的阳极与阴极之间。吸收电容最好选用无感电容器, 接线应尽量短。</p> <p>过电压阻容吸收回路的时间常数 (即 RC) 是固定的, 有时对时间短、峰值高、能量大的过电压的抑制效果较差。</p> <p>(2) 硒堆吸收: 在变流装置的进出线端并接硒堆或压敏电阻等非线性元件。硒堆的特点是其动作电压与温度有关, 温度越低耐压越高; 另外硒堆还具有自恢复特性, 能多次使用。</p> <p>(3) 压敏电阻吸收: 压敏电阻体积小, 反应快, 能够吸收由于雷击等原因产生的能量较大、持续时间较长的过电压。三相整流模块和三相交流模块均需要三只压敏电阻, 单相整流模块和单相交流模块需要一只压敏电阻。全部接在交流输入端。</p> <p>压敏电阻是以氧化锌为基体的金属氧化物非线性电阻, 在正常电压下呈高阻状态, 只有很小的漏电流; 当发生过电压时, 迅速变成低阻抗, 电流迅速增加, 泄漏了能量, 对过电压起抑制作用。</p>

2. 过电流保护

晶闸管体积小、热容量小, 当流过大于额定值的电流时, 热量来不及散发, 使得结温迅速升高, 最终将导致 PN 结被烧坏、晶闸管报废。

1) 过电流产生的原因	变流装置中晶闸管的损坏, 触发电路或控制系统发生故障, 交流电源电压过高、过低或缺相, 负载过载或短路, 相邻设备故障影响等都是产生过电流的原因。
2) 过流保护措施	快速熔断器是过流保护使用最多、最广泛的过流保护器件。实用时, 快速熔断器的额定电压应大于输入端电压。

3. 过热保护

1) 热量的产生	晶闸管中有电流通过时，会产生一定的压降和功耗。流过的电流越大，功耗也越大，产生的热量也就越大。如果不把这些热量及时、快速地散掉，就会导致温度升高，甚至烧坏管芯，所以要采取适当的保护措施。
2) 保护措施	<p>(1) 安装散热器：散热器是进行过热保护的首选。功率稍大的晶闸管及模块都配带相匹配的散热器。</p> <p>(2) 加装热保护器件：在大电流电路中，尽量选择具有过热保护功能的器件，但散热器和风机通常也是不可缺少的。</p> <p>(3) 加强通风，可安装电扇或风机。</p> <p>(4) 当散热条件不符合规定要求（如室温超过 40℃、强迫风冷的出口风速不足 6m/s 等）时，器件或模块的额定电流应立即降低使用。</p>

4.2 触发电路

控制晶闸管导通的电路称为触发电路。通常按组成电路的主要元件名称进行分类，如简单触发电路、单结晶体管触发电路、晶体管触发电路、集成电路触发器和计算机控制数字触发电路等。


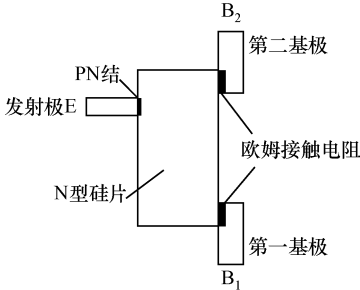
4.2.1 晶闸管控制极特性

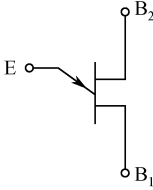
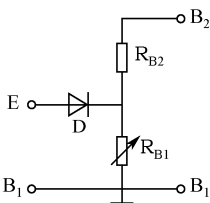
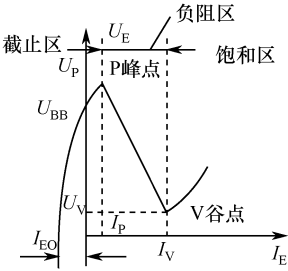
1) 导通条件	晶闸管由阻断状态转为导通状态需要在承受正向阳极电压的同时，还要在控制极（即门极）加上适当的触发电压。如阳极电压过低，将不能被触发。
2) 触发信号类型	晶闸管的触发信号可以是交流正半周的一部分，也可是直流、锯齿波，还可以是正脉冲。为了减少门极损耗，确保触发时刻的准确性，触发信号通常采用脉冲信号。
3) 触发功率	为使晶闸管可靠触发，触发信号要具有足够的功率。触发电路提供的触发电压和触发电流必须大于晶闸管产品参数提供的门极触发电压与触发电流值。例如，KP50 要求触发电压不小于 3.5V，触发电流不小于 100mA；KP200 要求触发电压不小于 4V，触发电流不小于 200mA。
4) 保证安全	触发信号不许超过晶闸管规定的门极最大允许峰值电压与峰值电流，以防损坏晶闸管的门极。当触发信号为脉冲时，只要触发功率不超过规定值，触发电压或触发电流的幅值在短时间内允许大大超过其额定值。一般正向控制电压不要超过 10V。温度升高后，要适当降低触发功率。
5) 同步问题	要使晶闸管在每个周期都在相同的相位上触发，触发脉冲必须与主回路电源电压保持同步。所以晶闸管的触发电压必须与主回路的电源电压保持固定的相位关系，即实现同步。
6) 触发脉冲	<p>(1) 触发脉冲宽度</p> <p>要使被触发的晶闸管保持导通状态，晶闸管的阳极电流在触发脉冲消失前必须大于维持电流。所以要求触发脉冲应具有一定的宽度，特别是当负载为电感性负载时，必要时可使用双脉冲触发。例如，单相整流电路带阻性负载时，触发脉冲宽度应大于 10μs；电感性负载时应大于 100μs。三相全控桥采用单脉冲触发时，脉宽应大于 60°（通常取 90°）；如采用双脉冲触发时，脉宽为 10° 左右即可。</p>

6) 触发脉冲	(2) 触发脉冲前沿要陡 晶闸管要求触发脉冲具有很陡的前沿，以便实现精确的触发导通控制。
	(3) 移相范围 触发脉冲的移相范围必须满足主电路的要求，但脉冲的移相范围与主电路的形式、负载性质及变流装置的用途有关。例如，单相全控桥带电阻性负载时要求触发脉冲移相范围为 180° ；带感性负载（不续流管）时要求移相范围为 90° 。三相半波整流电路带电阻性负载时要求移相范围为 150° ；三相全控桥式整流电路带电阻性负载时要求触发脉冲的移相范围是 120° 。
7) 抗干扰	触发电路要具有很强的抗干扰能力，杜绝产生误触发信号。

4.2.2 单结晶体管

单结晶体管（又称双基极二极管，简称 UJT）是只有一个 PN 结和两个电阻接触电极的半导体器件。单结晶体管广泛应用在振荡、延时和触发等电路中。

1) 常见单结晶体管（见图 4-17）	 图 4-17 单结晶体管
2) 结构	<p>单结晶体管的结构示意图如图 4-18 所示。在高电阻率的 N 型硅片一侧的两端各引出一个电极，分别称为第一基极 B_1 和第二基极 B_2；在硅片另一侧较靠近 B_2 处制作一个 PN 结，在 P 型硅上引出一个电极，称为发射极 E。两个基极间的电阻 R_{bb} 一般可分为两段，即 $R_{bb}=R_{b1}+R_{b2}$。其中，R_{b1} 是第一基极 B_1 至 PN 结的电阻；R_{b2} 是第二基极 B_2 至 PN 结的电阻。R_{bb} 的值一般为 $2\sim 15k\Omega$。</p>  图 4-18 单结晶体管结构示意图
3) 符号	(1) 文字符号：单结晶体管的文字符号是 V 或 VU，也有用 T、Q、DJT 表示的。
	(2) 单结晶体管的图形符号和等效电路如图 4-19 所示。

3) 符号	<div><div></div><div></div></div> <div>(a) 图形符号 (b) 等效电路</div> <div>图 4-19 单结二极管图形符号与等效电路</div>
4) 分压比	<p>当在两基极间加上电压 U_{BB} 时, R_{B_1} 上分得的电压为</p> $U_{B_1} = \frac{U_{BB}}{R_{B_1} + R_{B_2}} \cdot R_{B_1} = \frac{R_{B_1}}{R_{BB}} \cdot U_{BB} = \eta U_{BB}$ <p>式中, η 称为分压比; R_{B_1} 是第一基极 B_1 与发射极 E 之间的电阻, 其数值随发射极电流 I_E 的变化而变化; R_{B_2} 为第二基极与发射极之间的电阻, 其数值与发射极电流 I_E 无关。</p>
5) 特性曲线	<p>如果发射极电压 U_E 由零逐渐增加, I_E 也随着变化, 两者的关系用曲线表示就可得到单结晶体管的伏安特性曲线。单结晶体管的伏安特性如图 4-20 所示。曲线可以分为截止区、负阻区、饱和区三部分。</p> <div></div> <div>图 4-20 单结晶体管的伏安特性</div>
6) 特性分区	<div>(1) 截止区 当发射极电压 $U_E < \eta U_{BB}$ 时, 管内 PN 结处于反向偏置状态, 管子截止。在截止区, 发射极只有很小的漏电流 I_{CEO}。</div> <div>(2) 负阻区 在 $U_E = \eta U_{BB} + U_D$ 时, 单结晶体管的 PN 结导通, 发射极 E 和基极 B_1 之间变成导通状态, R_{B_1} 迅速减小, 发射极电流 I_E 迅速增大, 而 E 和 B_1 之间的电压却随之减小, 即动态电阻 $\Delta U_E / \Delta I_E$ 为负值。这种电压随电流增加反而下降的特性, 称为负阻特性, 表明管子由截止区进入了负阻区。这个转折点 P 称为峰点, 与其对应的发射极电压和电流, 分别称为峰点电压 U_P 和峰点电流 I_P。 I_P 是正向漏电流, 它是使单结晶体管导通需要的最小电流; 而峰点电压 $U_P = \eta U_{BB}$。</div> <div>当第二基极 B_2 的电位高于发射极 E 的电位后, 电阻 R_{B_2} 基本上为定值。单结晶体管的峰点电压为</div> $U_P = \eta U_{BB} + U_D$ <div>式中 U_D 为单结晶体管中 PN 结的正向压降, 一般认为是 $0.7V$。</div> <div>(3) 饱和区 当发射极电流 I_E 增大到某一数值时, 电压 U_E 下降到最低点。当调节 R_P 使发射极电</div>

6) 特性分区	流继续增大时, 发射极电压略有上升, 但变化不大, 即进入了饱和区。这个特性曲线上的最低点称为谷点 V 。与谷点相对应的发射极电压是谷点电压 U_V 、发射极电流为谷点电流 I_V 。 U_V 是维持单结晶体管导通的最小发射极电压, 如果 $U_E < U_V$, 管子将重新进入截止状态。		
7) 峰值电压值	单结晶体管的峰点电压 U_P 与外加固定电压 U_{BB} 及其分压比 η 有关。而分压比是由管子结构决定的, 一般视为常数。分压比 η 不同或外加电压 U_{BB} 的数值不同时, 管子的峰值电压 U_P 也不同。		
8) 谷点电压	单结晶体管的谷点电压 U_V 为 $2\sim 5V$ 。在触发电路中, 通常选用分压比 η 、谷点电流大一些、谷点电压 U_V 低一些的单结晶体管, 以增大输出脉冲幅度和移相范围。		
9) 主要参数	(1) 基极间电阻 (R_{BB})。	发射极开路时, 基极 B_1 、 B_2 之间的电阻称为基极间电阻, 其数值随温度上升而增大。	
	(2) 分压比 (η)。	分压比是由管子内部结构决定的常数, 其值一般在 $0.5\sim 0.9$ 之间。	
	(3) 反向电压 (U_{EB_1})。	发射极 E 与第一基极 B_1 间的反向电压 U_{EB_1} 是指第二基极 B_2 开路, 在发射极与第二基极间加额定反向电压 U_{EB_2} 情况下, 基极 B_1 与发射极 E 之间的反向耐压。	
	(4) 反向电流 (I_{EO})	反向电流是指当第一基极 B_1 开路、分压比为 $0.5\sim 0.9$ 时, 在额定反向电压 U_{EB_2} 作用下, 发射极 E 与第二基极 B_2 间的反向电流。	
	(5) 发射极饱和压降 (U_{EO})	发射极饱和压降是指当发射极流过额定电流时, 发射极 E 与第一基极 B_1 间的电压降。	
	(6) 峰点电流 (I_P)	峰值电流是指在单结晶体管刚开始导通时, 发射极电压为峰点电压 U_P 时的发射极电流。	
10) 常见单结晶体管主要参数	常见单结晶体管主要参数见表 4-4。		
11) 型号命名	<p>单结晶体管的型号命名如下:</p> <div><div>B</div><div>T</div><div>3</div><div>5</div><div>第四部分表示单结晶体管耗散功率, “5”表示功率为500mW</div><div>第三部分表示电极数目, “3”表示有三个电极</div><div>第二部分表示单结晶体管的种类, “T”表示特种管</div><div>第一部分表示单结晶体管的制作材料, “B”表示半导体</div></div>		

表 4-4 常见单结晶体管主要参数

型号	分压比 η	基极间电阻 R_{BB} (k Ω)	调制电流 I_{B_1} (mA)	峰点电流 I_P (mA)	谷点电流 I_V (mA)	谷点电压 U_V (V)	耗散功率 P_{B_2M} (mW)
BT31A	0.3~0.55	3~6	5~30	≤ 2	≥ 1.5	≤ 3.5	100
BT31B		5~12	≤ 30				
BT31C	0.45~0.75	3~6					
BT31D		5~12					
BT32A	0.3~0.55	3~6	8~35				

续表

型号	分压比 η	基极间电阻 R_{BB} (k Ω)	调制电流 I_{B_1} (mA)	峰点电流 I_P (mA)	谷点电流 I_V (mA)	谷点电压 U_V (V)	耗散功率 P_{B_2M} (mW)	
BT32B	0.3~0.55	5~12	≤ 35	≤ 2	≥ 1.5	≤ 3.5	250	
BT32C	0.45~0.75	3~6						
BT32D		5~12						
BT32E	0.65~0.9	3~6						
BT32F		5~12						
BT33A	0.3~0.55	3~6	8~40				400	
BT33B		5~12	≤ 40					
BT33C	0.45~0.75	3~6						
BT33D		5~12						
BT37A	0.3~0.55	3~6	3~40					700
BT37A		5~12	≤ 40					
BT37C	0.45~0.75	3~6						
BT37D		5~12						

4.2.3 可编程单结晶体管（PUT）

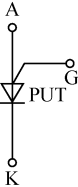
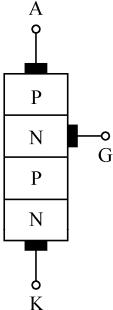
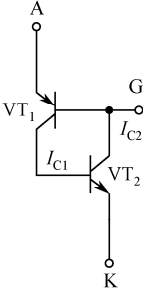
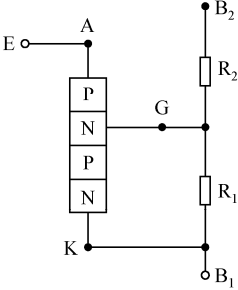
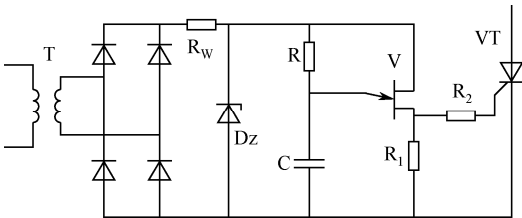
1) 符号	<p>(1) 文字符号。可编程单结晶体管的文字符号一般为 V 或 PUT。</p> <p>(2) 图形符号如图 4-21 所示。</p> <div></div>
2) 结构和等效电路	<p>可编程单结晶体管的结构如图 4-22 (a) 所示。它是 PNPN 四层结构、三个引出端。三个引出端分别是阳极 A、阴极 K、门极 G。</p> <p>PUT 可等效为由 PNP 硅管 VT₁ 和 NPN 硅管 VT₂ 构成的互补晶体管，如图 4-22 (b) 所示。</p> <p>带外接电阻时的等效结构如图 4-22 (c) 所示。</p> <div><div><p>(a) 结构</p></div><div><p>(b) 等效电路</p></div><div><p>(c) 带外接电阻时的等效结构</p></div><div>$R_{BB}=R_1+R_2$$\eta=\frac{R_1}{R_1+R_2}$</div></div>

图 4-22 可编程单结晶体管的结构与等效电路

3) 工作原理	<p>当 $U_A>U_G+0.7V$ 时, VT_1 导通, I_{C1} 变大, 并使 VT_2 导通, I_{C2} 增大时 I_{C1} 进一步增大, 形成电流正反馈。导致 PUT 饱和导通, 阳极 A 与阴极 K 之间的电阻急剧下降, 呈现负阻特性。</p> <p>其中, U_A 为阳极电压, U_G 为门极电压, $0.7V$ 是 VT_1 发射结的正向压降 U_{EB} 的值。</p>									
4) 基本特点 可编程单结晶体管 (又称程控单结晶体管、可调单结晶体管, 缩写 PUT)实质上是一个门控晶闸管, 是与单结晶体管特性相近的半导体器件。	<p>(1) 具有负阻特性。</p> <p>(2) 可以用外接电阻 R_1、R_2 取代基极电阻 R_{B1}、R_{B2}, 只需改变两者的电阻比, 就可从外部调整其参数值, 如两基极间电阻 R_{BB}、谷点电流 I_V 和峰点电流 I_P。</p> <p>(3) 通态电压可为 $1.5V$。</p> <p>(4) 门极与阳极间的漏电流小 (一般低于 $10nA$)。</p> <p>(5) 输出峰值电压较高 (一般为 $11V$ 左右)。</p> <p>(6) 失调电压低 (一般为 $0.35V$)。</p>									
5) 封装与型号	<p>(1) 封装: PUT 器件的外形与小功率晶体管相似, 主要有金属和塑料两种封装。</p> <p>(2) 型号: 国产型号为 BT40 等; 国外典型产品有 2N6027、2N6028、NTE6402、CP624、CP622、BRY39、MMPT6027、BRY56 等。</p>									
6) 可编程单结晶体管与普通单结晶体管的性能比较 可编程单结晶体管与普通单结晶体管的性能比较见表 4-5。	<p>表 4-5 可编程单结晶体管与普通单结晶体管性能比较</p> <table><tr><td></td><td>可编程单结晶体管 PUT</td><td>普通单结晶体管 UJT</td></tr><tr><td>分压比</td><td>$\eta=\frac{R_1}{R_1+R_2}$ (可调)</td><td>$\eta=\frac{R_{B1}}{R_{B1}+R_{B2}}$ (不可调)</td></tr><tr><td>触发电压</td><td>$U_g=\eta U_{BB}+0.7V$</td><td>$U_g=\eta U_{BB}+0.7V$</td></tr></table>		可编程单结晶体管 PUT	普通单结晶体管 UJT	分压比	$\eta=\frac{R_1}{R_1+R_2}$ (可调)	$\eta=\frac{R_{B1}}{R_{B1}+R_{B2}}$ (不可调)	触发电压	$U_g=\eta U_{BB}+0.7V$	$U_g=\eta U_{BB}+0.7V$
	可编程单结晶体管 PUT	普通单结晶体管 UJT								
分压比	$\eta=\frac{R_1}{R_1+R_2}$ (可调)	$\eta=\frac{R_{B1}}{R_{B1}+R_{B2}}$ (不可调)								
触发电压	$U_g=\eta U_{BB}+0.7V$	$U_g=\eta U_{BB}+0.7V$								
7) 应用	<p>(1) 应用领域</p> <p>可编程单结晶体管主要用于构成晶闸管触发电路、脉冲和计时电路、振荡器、扫描电路和检测电路等。</p> <p>(2) 典型应用电路</p> <p>PUT 的典型应用电路如图 4-23 所示。</p> <div></div> <p>图 4-23 PUT 典型电路</p> <p>图中, 外接电阻 R_1、R_2 决定门极 G 的电压; 工作电压确定后, 电阻 R_1 和电容 C 决定了充电的快慢, 形成的脉冲由阴极 K 输出到晶闸管的控制极。</p>									

4.2.4 实用电路

1. 单晶体管构成晶闸管触发电路

1) 同步电压	<p>用 UJT 构成的晶闸管触发电路如图 4-24 所示。图中，取自主电路的正弦交流电通过同步变压器 T 降为较低的交流电压，然后经单相整流桥变成脉动直流。稳压管 Dz 和电阻 R_W 的作用是削波，电阻 R_W 还具有限流作用。当整流桥输出的脉动电压小于稳压管的稳压值时，Dz 不导通，其两端的电压等于整流输出电压；如果脉动电压大于稳压管的稳压值，Dz 将被击穿，其两端电压等于其稳压值；整流桥输出电压高出稳压值的部分降在电阻 R_W 上。电路中 Dz 两端的电压波形近似梯形波，可起到同步作用。</p>  <p>图 4-24 单晶体管构成晶闸管触发电路</p>
2) 振荡电路 振荡电路由单晶体管 V、R、C、R ₁ 组成。	<p>(1) 电容充电</p> <p>加在主电路的正弦波电压，每一半波结束和开始的一段时间，电容 C 开始充电；但两端间电压很小，电路不起振。</p>
	<p>(2) 单晶体管导通，电容放电，晶闸管导通。</p> <p>随着电源电压的上升，电容充电使两端的电压升至单晶体管的峰点电压时，单晶体管导通，电容放电。放电电流流过 R₁ 与被触发晶闸管的门极的并联电路形成输出，为晶闸管提供触发脉冲，使晶闸管导通。</p>
	<p>(3) 晶闸管导通后，门极失去控制作用。</p> <p>在主电路电压的半周接近结束时，振荡电路的电源电压进入梯形波的后沿而迅速下降；同时电容放电致使其两端间电压趋于零。</p>
	<p>(4) 充电、放电循环</p> <p>在主电路电压的每一个半波中，电容 C 总是从零开始充电，保证了触发脉冲与主电路电压的同步。电容 C 不断地充电、放电，每一次循环都有脉冲送出；但晶闸管导通后，触发电路发出的脉冲就不再起作用。</p>
3) 电路特点及应用	<p>(1) 特点</p> <p>由单晶体管组成的晶闸管触发电路结构简单、调节容易，输出的脉冲前沿陡，抗干扰能力强。</p>
	<p>(2) 应用</p> <p>电路产生的脉冲较窄，触发功率及移相范围较小，通常用于中、小功率系统中。</p>

2. 单晶体管构成的振荡电路

由单晶体管等组成的触发电路又称为单晶体管张弛振荡器，电路组成如图 4-25 所示。

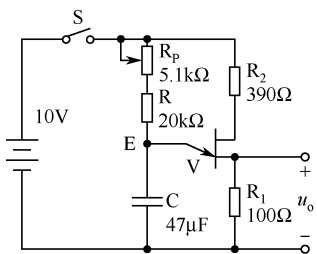


图 4-25 单结晶体管振荡电路

1) 电路组成	电源通过开关 S 接通电路，通过电阻 R_1 、 R_2 加到单结晶体管的两个基极上，同时又通过 R 、 R_p 与电容器 C 相接， u_o 是输出信号。
2) 工作过程	<p>工作时，合上开关 S，电源通过 R_p、R 给电容 C 充电，电容两端间电压按指数规律上升。当 $U_c < U_p$ 时，单结晶体管处于截止状态，R_1 两端间电压近似为零。随着充电的进行，电容上的电压 U_c 升至单结晶体管的峰点电压 U_p 时，单结晶体管的 E、B_1 极之间导通，电阻 R_{b_1} 急剧减小，电容上的电压通过 R_1 放电。由于 R_1 很小，放电很快，放电电流在 R_1 上形成一个脉冲电压 u_o 并输出。随着放电时间的延续，电容上的电压 U_c 不断下降直到单结晶体管的谷点电压 U_v 时，E、B_1 极之间恢复阻断状态，单结晶体管从导通变为截止，输出电压 u_o 下降到零，完成一次振荡。</p> <p>单结晶体管截止后，电源又对 C 充电，并重复上述过程，结果在 R_1 上得到一个周期性尖脉冲输出电压，其波形如图 4-26 所示。</p>
3) 时间常数	振荡电路的工作过程表现了单结晶体管的负阻特性和 RC 充放电特性，如果改变 R_p 的大小，就可以改变电容充放电的速度，使输出的脉冲前移或后移，从而改变触发角，控制晶闸管触发导通的时刻。由此可知，电容 C 的充放电时间常数 ($T=RC$) 增大时，触发脉冲后移，晶闸管推迟导通； T 减小时，触发脉冲前移，晶闸管提前导通。

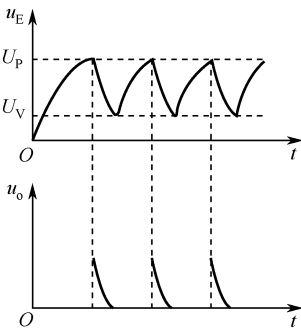


图 4-26 振荡器输出脉冲电压波形

3. 可编程单结晶体管构成的张弛振荡电路

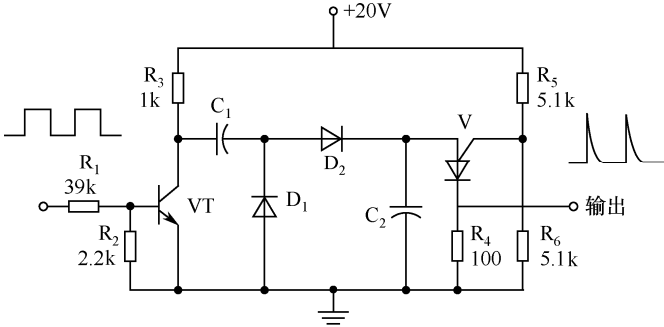
1) 电路原理图 可编程单结晶体管构成的张弛振荡电路如图 4-27 所示。	
--	--

图 4-27 可编程单结晶体管张弛振荡电路

1) 电路原理图 可编程单结晶体管构成的张弛振荡电路如图 4-27 所示。	该电路的振荡频率可以从 0.01Hz 至 10kHz 连续调节, 采用温度补偿后, 振荡频率的稳定性可达 0.002%/℃ 以下, 这一点是单结晶体管张弛振荡器所做不到的。
2) 工作原理 R ₁ 、R ₂ 构成分压电路, 其取值决定了 U _s 的大小。电容 C 经 R ₁ 充电到一定值时, 可编程单结晶体管导通, 输出一个脉冲。电容反复充放电, 形成振荡。	电路中, R ₁ 按下式选取 $R_1 \leq \frac{E-U_P}{I_{go}+I_P} = \frac{E(1-\eta)-U_t}{I_{go}+I_P}$ $R_1 \geq \frac{E-U_V}{I_V}$ 式中, E、U _P 、U _t 、U _V 、I _P 、I _V 的意义分别是电源电压、峰点电压、阳极电压、谷点电压、峰点电流、谷点电流; I _{go} 是指电容器 C 的漏电流。

4. 低频分频器

低频分频器电路如图 4-28 所示。

1) 电路原理图	
2) 工作原理 电路中的电容器 C ₁ 和 C ₂ 决定了分频器的分频比。	当电路电压为 20V、VT 截止时, 电容器 C ₁ 和 C ₂ 经 R ₃ 充电后的电压是 10V。当正脉冲加到 VT 的基极上时, VT 导通, C ₁ 经 VT 发射极、集电极、二极管 D ₁ 放电; 而 C ₂ 仍保持 10V 的电压。当 VT 关断时, C ₁ 和 C ₂ 再次充电, 当 C ₂ 充电到 PUT 峰点电压时, 使 PUT 导通, C ₂ 经 V 的阳极、阴极、R ₄ 放电; 在 R ₄ 上输出一个尖峰脉冲; 同时 C ₁ 充电到电源电压。C ₂ 放电 C ₁ 充电不久 PUT 就关断。下一个周期从另一个正脉冲作用在 VT 的基极开始, C ₁ 再次放电, 如此循环往复, 周期性地输出尖峰脉冲。
3) 输入输出间的关系	输入信号和输出信号的频率可以近似表示为 $f_{in} \approx \frac{(C_1+C_2)}{C_1} f_{out}$ 。改变 PUT 的程控方式, 即改变 $\frac{R_6}{R_5+R_6}$ 的比值就可以改变门极上的电压, 通过减小 C ₁ 和 C ₂ 的比值就减小分频范围, 增大其比值就能增大分频范围。

4.2.5 检测与判断

1. 单晶体管的检测与判断

1) 判断单 晶体管发 射极 E	将万用表置于 $R\times 100$ 挡或 $R\times 1k$ 挡。用黑表笔接假设的发射极，红表笔接另外两极，如果两次测量结果都是低电阻时，表明黑表笔接的就是单晶体管的发射极。
2) 判断单 晶体管的 基极 B_1 和 B_2	将万用表置于 $R\times 100$ 挡或 $R\times 1k$ 挡。用黑表笔接发射极，红表笔分别接另外两极，两次测量结果中，电阻大的一次，红表笔接的就是 B_1 极。有些管子的发射极 E 与第一基极 B_1 间的正向电阻值较小，上述判断方法就会出错；使 B_1 、 B_2 颠倒，但这并不会损坏单晶体管，只是影响输出脉冲的幅度。在实际应用中，如发现输出的脉冲幅度偏小时，只要将 B_1 、 B_2 对调就行。
3) 判定管 子好坏	<p>(1) 测发射极与基极间电阻：将万用表置于 $R\times 1k$ 挡，将黑表笔接发射极 E，红表笔依次接两个基极 (B_1 和 B_2)，正常时均应有几千欧至十几千欧的电阻值；然后将红表笔接发射极 E，黑表笔依次接两个基极，正常时阻值应为无穷大。</p> <p>(2) 测两基极间正反向电阻：正常情况下，双基极二极管两个基极之间的正反向电阻值均应在 $2\sim 10k\Omega$ 范围内，若测得两极之间的电阻值与正常值相差较大时，说明该单晶体管已损坏。</p>

2. 可编程单晶体管的检测与判断

1) 可编程 单晶体管 的电极识别	<p>(1) 看电路图：在阳极 A 与门极 G 之间有一个 PN 结，而在阳极 A 和阴极 K 之间包含正反向串联的 PN 结。由此可首先确定 A、G 电极，剩下的一引脚肯定是阴极 K。</p> <p>(2) 用万用表：将万用表置于 $R\times 1k\Omega$ 挡，两支表笔各接任一电极。只要读数为低电阻值，说明测得的是 PN 结正向电阻；这时黑表笔接的是阳极，红表笔接的是门极。这是因为门极 G 与阳极 A 之间的反向电阻趋于无穷大，而阳极 A 与阴极 K 之间的电阻也总是无穷大，均不会出现低阻的情况。</p>
2) 检测触 发能力	<p>可编程单晶体管的触发灵敏度很高，在开路时只要门极上有感应电压就能使 A、K 间导通。为此可先给 A、G 之间加一根短路线强迫器件关断。</p> <p>这时将万用表置于 $R\times 1k\Omega$ 挡。用黑表笔接 A 极，红表笔接 K 极，读数应为无穷大；然后拿开 A、G 间的短路线，用手指触摸门极 G，利用人体感应电压使管子导通。此时 A、K 之间的电阻值如降为几欧姆，说明管子已被触发，否则说明管子性能变坏或已损坏。</p>

4.3 可控整流与逆变电路

整流和逆变是晶闸管应用的最重要的两个分支，在直流电源、变频器、逆变器、中频电源和直流输电等领域广为应用。

4.3.1 单相整流

1. 单相半波可控整流电路

可控整流电路是一种以晶闸管为基础的整流装置，具有效率高、响应快、无机械噪声和磨损、体积小、重量轻等诸多优点。单相半波可控整流电路原理图如图 4-29 所示。

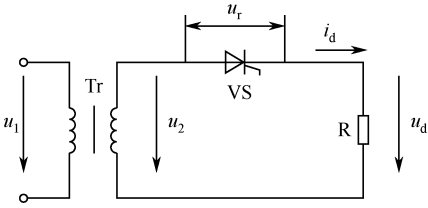


图 4-29 单相半波可控整流电路原理图

图中，VS 为晶闸管， u_1 为变压器输入电压， u_2 为变压器输出电压， i_d 为整流电流（也是负载电流）， u_d 为整流输出电压（即负载电阻 R 上的电压降）。

<div>1) 工作原理</div> <div>单相半波可控整流电路的优点是电路简单，调整方便，实现容易。</div>	<p>当变压器副边电压的正半周加在晶闸管上时，无触发信号的晶闸管并不导通，此时输出电压为零；只有晶闸管被触发导通后，负载 R 中才有电流通过。当电压的负半周加在晶闸管上时，晶闸管阻断，负载 R 中无电流流过。</p>
<div>2) 电压、电流波形图</div> <div>晶闸管可认为是理想开关元件（即晶闸管导通时其管压降等于零，关断时其漏电流等于零），其工作波形如图 4-30 所示。图中，U_d 为整流输出平均电压，u_d 为整流输出电压，u_T 为晶闸管上的电压降，u_g 为控制信号电压，i_d 为整流电流。</div>	
<div>3) 电压、电流分析</div>	<p>(1) 在电源电压正半周</p> <p>ωt 在 $0 \sim \alpha$ 时段，晶闸管虽然承受正向阳极电压，但是在未加触发脉冲之前，晶闸管 VS 处于阻断状态，电路中无电流流过，此时负载电阻两端电压 u_d 为零。</p> <p>在 $\omega t = \alpha$ 处加触发脉冲，晶闸管开始导通；负载上有电流通过，$u_d = u_2$。</p> <p>在 $\omega t = \pi$ 时刻，电源电压过零，晶闸管电流小于维持电流时就会关断，负载电流又变为零，整流电压 u_d 也为零。</p>

3) 电压、电流分析

(2) 在电源电压的负半周

晶闸管承受反向电压而处于关断状态, 负载电流为零, 整流电压始终为零, 直到电源电压 U_2 的下一周期再加触发脉冲, 晶闸管才再一次导通。整流输出电压 u_d 和负载电流 i_d 的波形相位相同。

(3) 改变触发角 α 的大小, 整流输出电压 u_d 的波形就会发生变化, 负载上的输出电压平均值随之发生变化, 显然 $\alpha=180^\circ$ 时, u_d 为零。 u_d 和晶闸管两端电压 u_T 的波形如图 4-30 所示。

(4) 脉动直流电压

由于晶闸管只在电源电压正半波内导通, 输出电压 u_d 的极性是不变、但瞬时值变化的脉动直流, 故称半波整流。

(5) 触发角 α (也称触发延迟角或控制角) 是指晶闸管从承受正向电压开始到导通时为止的电角度。

(6) 导通角 θ 是晶闸管在一个周期内处于导通状态的电角度。

(7) 相控方式

是指通过改变触发脉冲相位来控制直流输出电压大小的相位控制方式。

① 整流输出电压平均值 U_d 。

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}u_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}u_2}{\pi} \frac{1+\cos\alpha}{2} = 0.45u_2 \frac{1+\cos\alpha}{2}$$

由上式可见, 负载电阻上的直流电压是触发角 α 的函数。改变 α 的大小就可以控制直流电压 U_d 的数值。

② 输出直流电流平均值 I_d 。

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 0.45 \frac{u_2}{R} \frac{1+\cos\alpha}{2}$$

③ 输出电压有效值 U 。

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}u_2 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = u_2 \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{2\pi}}$$

④ 输出电流有效值 I 。

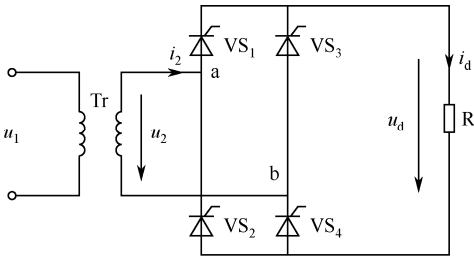
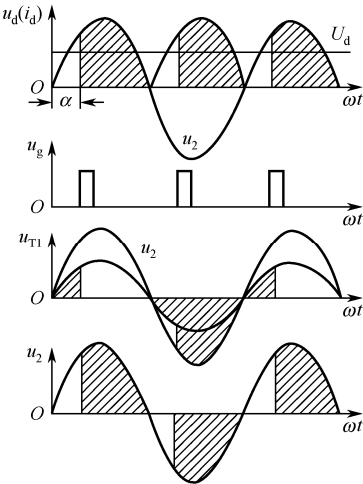
$$I = \frac{U}{R} = \frac{u_2}{R} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{2\pi}}$$

由于变压器副边输出的有功功率 $P=UI$, 电源视在功率 $S=u_2 I$ (u_2 是电源电压有效值), 所以功率因数是

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI}{u_2 I} = \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{2\pi}}$$

由上式可知, 功率因数 $\cos\varphi$ 是 α 的函数, 当 $\alpha=0$ 时, $\cos\varphi=0.707$ 。 α 越大, 相控整流输出电压越低。晶闸管承受的最大正反向电压 $U_m=\sqrt{2}u_2$ 。

2. 单相桥式全控整流电路

<div>1) 电路原理图</div> <div>电阻性负载的单相全控桥式整流电路如图 4-31 所示。图中，$VS_1\sim VS_4$ 为晶闸管，u_1 为变压器输入电压，u_2 为变压器输出电压，i_d 为整流电流，u_d 为整流输出电压（即负载电阻 R 上的电压降）。</div>	<div></div> <div>图 4-31 单相全控桥式整流电路原理图</div>
<div>2) 工作原理</div> <div>由于此电路在正负半周内都能实现整流，所以称为全波可控整流电路；输出整流电压在一个周期内脉动两次，所以又称为双脉波整流电路。</div> <div></div> <div>图 4-32 单相桥式整流电路电阻性负载时的波形</div>	<div>(1) 在电源电压 u_2 的正半周，晶闸管 VS_1、VS_4 承受正向电压，另两只晶闸管承受反向偏压。在 $0\sim\alpha$ 区间：四个晶闸管都不导通，负载 R 中无电流通过，输出电压为零。在 $\omega t=\alpha$ 处，被触发的晶闸管 VS_1、VS_4 导通，电流沿 $a\rightarrow VS_1\rightarrow R\rightarrow VS_4\rightarrow b$ 流通，此时负载上输出电压 $u_d=u_2$。电源电压反向施加到晶闸管 VS_2、VS_3 上，使其处于关断状态。在 $\omega t=\pi$ 时，因电源电压过零，晶闸管 VS_1、VS_4 阳极电流也下降为零而关断。</div> <div>(2) 在电压 u_2 的负半周，晶闸管 VS_2、VS_3 承受正向电压，VS_1、VS_4 承受反向电压。在 $\pi\sim\pi+\alpha$ 区间，晶闸管 VS_2 和 VS_3 未导通，承受的正向电压是 $(1/2)u_2$。在 $\omega t=\pi+\alpha$ 处，被触发的晶闸管 VS_2、VS_3 导通，电流沿 $b\rightarrow VS_3\rightarrow R\rightarrow VS_2\rightarrow a$ 流通，电源电压沿正半周期的方向施加到负载电阻上，负载上有输出电压 $u_d=-u_2$。此时电源电压反向施加到晶闸管 VS_1、VS_4 上，使其处于关断状态。</div> <div>在 $\omega t=2\pi$ 处，电源电压再次过零，VS_2、VS_3 阳极电流也下降为零而关断，负载上的电压 u_d 为零。下一个周期重复前面的过程。</div> <div>各时段的电压（电流）波形如图 4-32 所示。</div> <div>(3) 带阻性负载。单相桥式整流电路的移相范围是 $0\sim180^\circ$。$\alpha=0$ 时，整流输出电压最高；$\alpha=180^\circ$ 时，整流输出电压最小。</div> <div>(4) 脉动较半波好。负载上正负两个半波内均有相同方向的电流流过，从而使直流输出电压、电流的脉动程度较前述单相半波得到了改善。</div> <div>(5) 提高变压器利用率。变压器二次绕组在正负半周内均有大小相等、方向相反的电流流过，从而改善了变压器的工作状态并提高了变压器的有效利用率。</div>
<div>3) 各电量间关系</div>	<div>(1) 输出直流电压平均值 U_d 为</div> <div>$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}u_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}u_2}{\pi} \frac{1+\cos \alpha}{2}$<div>$= 0.9u_2 \frac{1+\cos \alpha}{2}$</div></div>

3) 各电量间关系	由上式可知, U_d 是触发角 α 的函数。 α 越大, U_d 越小。当 $\alpha=0$ 时, U_d 达到最大值, $U_d=0.9U_2$ 。当 $\alpha=\pi$ 时, $U_d=0$ 。其中, α 的移相范围是 180° 。
	(2) 输出直流电流平均值 I_d 为 $I_d = \frac{U_d}{R} = 0.9 \frac{u_2}{R} \frac{1+\cos \alpha}{2}$
	(3) 输出电压的有效值 U 为 $U = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\sqrt{2} u_2 \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = u_2 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$
	(4) 输出电流有效值 I 与变压器二次侧电流有效值 I_2 相同, 即 $I = I_2 = \frac{U}{R} = \frac{u_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$
	(5) 晶闸管的电流平均值 I_{dT} 为 $I_{dT} = \frac{1}{2} I_d$
	(6) 晶闸管的电流有效值 I_T 为 $I_T = \frac{u_2}{R} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_2$
	(7) 功率因数 $\cos \varphi$ 为 $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI}{u_2 I} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$ <p>功率因数 $\cos \varphi$ 是指电源所供给的有功功率 P 与电源的视在功率 S 之比, 显然功率因数与 α 相关, $\alpha=0$ 时, $\cos \varphi=1$。</p>

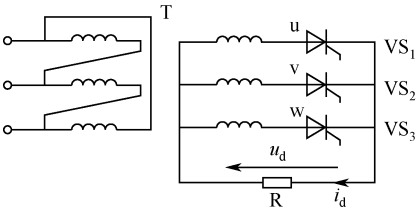
3. 单相全波可控整流电路

1) 电路构成	
单相全波可控整流电路 (又称单相双半波可控整流电路) 如图 4-33 所示, 电路带阻性负载。图中, 变压器 T 为二次绕组带中心抽头的整流变压器, 变压器二次电压为 $2u_2$, 晶闸管 VS_1 、 VS_2 共阴极连接, R 为阻性负载, u_d 是整流电压 (即负载电压)。	
图 4-33 单相全波可控整流电路 (阻性负载)	
2) 工 作原理	(1) 在电源电压 U_2 的正半周: VS_1 承受正向电压, 在 $\omega t=\alpha$ 时刻触发晶闸管 VS_1 , VS_1 即导通, VS_2 因承受反向电压而呈阻断状态。电流沿 $a \rightarrow VS_1 \rightarrow R \rightarrow O$ 流通, 负载输出电压 $u_d=u_2$, 电源电压过零时 VS_1 关断。
	(2) 电源电压负半周: 在 $\omega t=\pi+\alpha$ 时, 晶闸管 VS_2 受触发导通, 电流沿 $b \rightarrow VS_2 \rightarrow R \rightarrow O$ 流通, 负载输出电压 $u_d=-u_2$ 。所以一个周期内负载上得到两个半波电压, 整流输出电压波形与单相桥式全控整流电路带电阻负载时输出电压波形相同。

2) 工作原理	(3) 在 $(0, \alpha)$ 和 $(\pi, \pi+\alpha)$ 期间: 两个管子均不导通, 所以 VS_1 和 VS_2 串联承受变压器二次绕组上全部电压 $2u_2$ 。若认为两管特性一致, 则各自承受的电压为 u_2 。而只要两管中一管触发导通, 则另一管将承受二次绕组上全部电压 $2u_2$ 。所以单相全波整流电路带阻性负载时, 晶闸管器件可能承受的最大正向电压为 $\sqrt{2} u_2$, 最大反向电压 $2\sqrt{2} u_2$ 。
	(4) 全波可控整流的触发延迟角 α 的移相范围及导通角变化范围与单相桥式全控整流电路相同, 即移相范围为 180° , 导通角为 $180^\circ-\alpha$ 。其他基本数量关系也与单相全控桥整流电路相同。

4.3.2 三相整流器

1. 三相半波可控整流电路

1) 电路构成 三相半波可控整流电路(共阴极)如图 4-34 所示。图中, 三相整流变压器的一次绕组多接成三角形, 二次绕组多接成星形, 以减少三次谐波的影响。	<div></div> <p>图 4-34 三相半波可控整流电路</p> <p>三个晶闸管分别接在变压器副边的 u 相、v 相和 w 相上, 它们的阴极连在一起经负载与变压器二次绕组的中线相连, 构成共阴极电路。</p>
2) 工作原理 稳定工作时, 三个晶闸管的触发脉冲彼此间隔 120° 。	(1) 自然换相点。 规定 $\omega t=\pi/6$ 为控制角 α 的起点, 称为自然换相点。它是各相晶闸管可能被触发导通的最早时刻, 也是三相电源相电压正半周波形的交叉点, 在各相相电压的 $\pi/6$ 处, 即 ωt_1 、 ωt_2 、 ωt_3 点, 自然换相点之间彼此相差是 $2\pi/3$, 三相脉冲的相位差也是 120° 。
	(2) 在 ωt_1 时刻。 触发 VS_1 , 在 $\omega t_1\sim\omega t_2$ 区间, 三相电压的关系为 $u_u>u_v$ 、 $u_u>u_w$, u 相电压最高; VS_1 承受正向电压而导通, 输出电压 $u_d=u_u$ 。其他晶闸管承受反向电压而截止。 VS_1 通过的电流 i_{t1} 与变压器二次侧 u 相电流波形相同, 大小相等。
	(3) 在 ωt_2 时刻。 触发 VS_2 , 在 $\omega t_2\sim\omega t_3$ 区间, v 相电压最高。由于 $u_u<u_v$, VS_2 承受正向电压而导通, $u_d=u_v$ 。 VS_1 两端电压 $u_{t1}=u_u-u_v=u_{uv}<0$, 晶闸管 VS_1 承受反向电压而关断。在 VS_2 导通期间, VS_1 两端电压 $u_{t1}=u_u-u_v=u_{uv}$ 。
	(4) 换相。 在 ωt_2 时刻发生的、由一相晶闸管导通变换为另一相晶闸管导通的过程称为换相。
	(5) 在 ωt_3 时刻。 触发 VS_3 , 在 $\omega t_3\sim\omega t_4$ 区间, w 相电压最高。由于 $u_v<u_w$, VS_3 承受正向电压而导通, $u_d=u_w$ 。 VS_2 两端电压 $u_{t2}=u_v-u_w=u_{vw}<0$, 晶闸管 VS_2 承受反向电压而关断。在 VS_3 导通期间 VS_1 两端电压 $u_{t1}=u_u-u_w=u_{uw}$ 。
	(6) 一个周期。 在一个周期内, VS_1 只导通 $2\pi/3$, 在其余 $4\pi/3$ 时间承受反向电压而处于关断状态。

(7) 波形 (见图 4-35)。

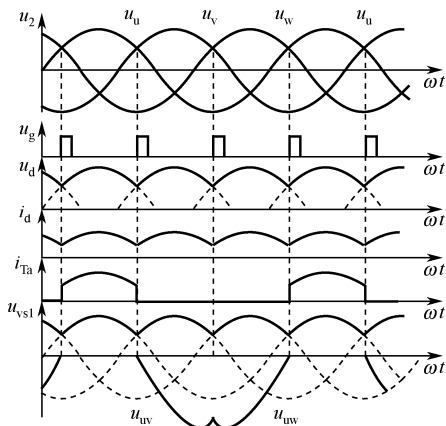


图 4-35 三相半波可控整流电路 $\alpha=0$ 时的波形

只有承受高电压的晶闸管才能被触发导通，输出电压 u_d 波形是导通晶闸管所在相电压的一部分；每周期脉动三次，是三相电源相电压正半波完整包络线，输出电流 i_d 与输出电压 u_d 波形相同 ($i_d=u_d/R$)。

(8) 电阻性负载时。

对于电阻性负载，在 $\alpha=0$ 时， VS_1 在 VS_2 、 VS_3 导通时仅承受反压，随着 α 的增加，晶闸管承受正向电压增加；其他两个晶闸管承受的电压波形相同，仅相位依次相差 120° 。

(9) 临界点。

在 $\alpha=30^\circ$ 处，是输出电压、电流连续和断续的临界点。输出电压波形的相应变化如图 4-36 所示。

当 $\alpha<30^\circ$ 时，后一相的晶闸管导通使前一相的晶闸管关断。当 $\alpha>30^\circ$ 时，导通的晶闸管由于交流电压过零变负而关断后，下一相的晶闸管未到触发时刻，此时三个晶闸管都不导通，直到后一相晶闸管被触发导通为止。

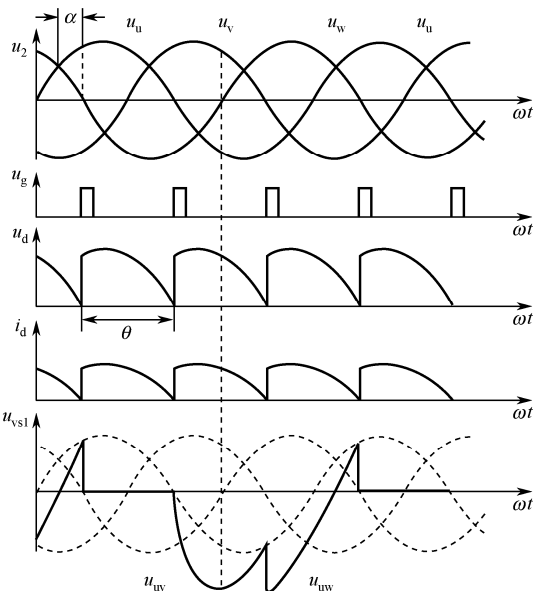


图 4-36 三相半波可控整流电路电阻负载 $\alpha=30^\circ$ 时的波形

2) 工作原理

稳定工作时，三个晶闸管的触发脉冲彼此间隔 120° 。

<div>2) 工作原理</div> <div>稳定工作时，三个晶闸管的触发脉冲彼此间隔120°。</div>	<div>(10) 当 $\alpha > 30^\circ$ 时，整流电压波形如图 4-37 所示。从图中可以看出，晶闸管的导通角增大，输出电压波形后移。</div> <div data-bbox="473 255 1018 797"></div> <div>图 4-37 三相半波可控整流电路电阻负载 $\alpha = 60^\circ$ 时的波形</div>
<div>3) 各电量间关系</div>	<div>(1) 对于电阻性负载，在 $\alpha = 0$ 时</div> <div>输出整流电压平均值 U_d 为</div> <div data-bbox="455 967 1028 1020">$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2}u_2 \sin \omega t d(\omega t) = 1.17u_2 \cos \alpha = 1.17u_2$</div> <div>晶闸管电流有效值 I_T 为</div> <div data-bbox="699 1073 789 1100">$I_T = 0.59I_a$</div> <div>(2) 对于电阻性负载，在 $\alpha > 30^\circ$ 时</div> <div>输出整流电压平均值 U_d 为</div> <div data-bbox="439 1201 1048 1254">$U_d = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi} \sqrt{2}u_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.675u_2 [1 + \cos(\pi/6 + \alpha)]$</div>
<div>4) 晶闸管电流有效值 I_T</div>	<div>$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}u_2 \sin \omega t}{R_d} \right)^2 d(\omega t)} = \frac{u_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{5\pi}{6} - \alpha + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right)}$</div>

2. 三相桥式全控整流电路

1) 电路构成

三相桥式全控整流电路可看作是三相半波可控整流电路共阴极接法（VS₁、VS₃、VS₅）和三相半波可控整流电路共阳极接法（VS₄、VS₆、VS₂）的串联组合，具体电路如图 4-38 所示。

三相半波可控整流的变压器存在直流磁化的问题，造成变压器发热和利用率下降。

三相桥式全控整流电路既提高了输出电压，又提高了变压器的利用率，还避免了直流磁化问题。

2) 工作原理

三相桥式全控整流电路必须同时有两个晶闸管导通，其中一个属于共阴组，另一个属共阳组，每个晶闸管的最大导通角为 120°。晶闸管之间的换相是在同一结构组中进行的，

即共阳极与共阳极的晶闸管换相，共阴极与共阴极的晶闸管换相。在这种电路中应采用双脉冲或宽脉冲的触发方式保证每隔 60° 导通一个晶闸管。

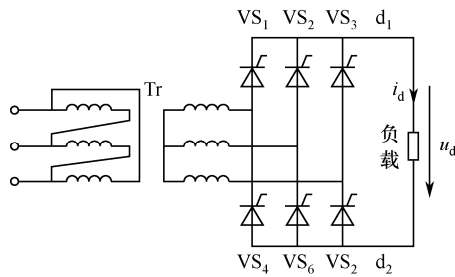


图 4-38 三相桥式全控整流电路原理图

晶闸管的导通顺序为 VS_1 、 VS_2 、 VS_3 、 VS_4 、 VS_5 和 VS_6 。

3) 当晶体管触发角 $\alpha=0$ 时

当晶闸管触发角 $\alpha=0$ 时，电路工作波形如图 4-39 所示。

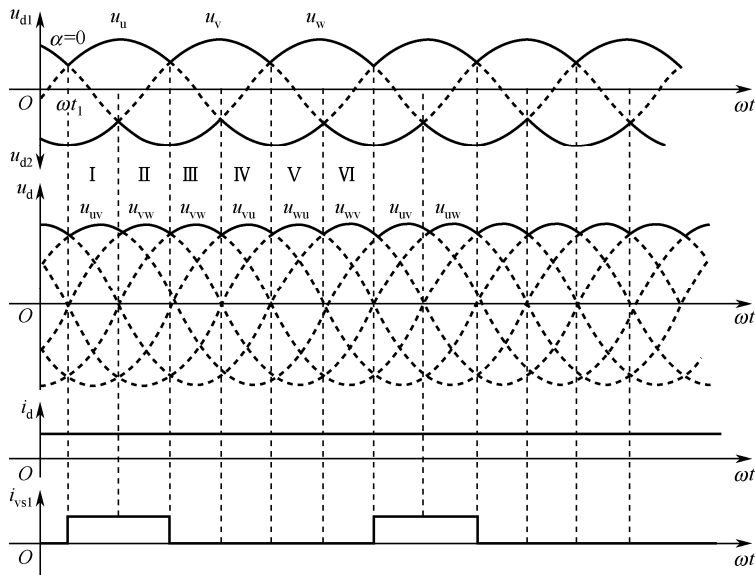


图 4-39 三相桥式全控整流电路带阻性负载 $\alpha=0$ 时的波形

对于共阴极组的三个晶闸管，阳极所接交流电压值最高的一个导通。而对于共阳极组的三个晶闸管，则是阴极所接交流电压值最低的一个导通。这样，任意时刻共阳极组和共阴极组中各有一个晶闸管处于导通状态，施加于负载上的电压为某一线电压。

在 $\alpha=0$ 时，各晶闸管均在自然换相点处换相。各自然换相点既是相电压的交点，同时也是线电压的交点。共阴极组晶闸管导通时，整流输出电压 u_{d1} 为相电压在正半周的包络线；共阳极组导通时，整流输出电压 u_{d2} 为相电压在负半周的包络线，总的整流输出电压 $u_d = u_{d1} - u_{d2}$ 是两条包络线间的差值，将其对应到线电压波形上，即为线电压在正半周的包络线。

4) 导通的晶体管及输出整流电压的情况

将波形中的一个周期等分为 6 段，每段为 60° ，每一段中导通的晶闸管及输出整流电压的情况如表 4-6 所示。

表 4-6 导通的晶闸管及输出整流电压的情况

时段	I	II	III	IV	V	VI
输出电压	u_{uv}	u_{uw}	u_{vw}	u_{vv}	u_{wu}	u_{vu}
导通晶闸管	VS ₆	VS ₁	VS ₂	VS ₃	VS ₄	VS ₅
	VS ₁	VS ₂	VS ₃	VS ₄	VS ₅	VS ₆

5) 通态时的电流波形与相应时段的 u_d 波形相同

图 4-39 中还给出了晶闸管 VS₁ 流过电流的波形，由此波形可以看出，晶闸管一周期中有 120° 处于通态，240° 处于断态；由于负载为电阻性，所以晶闸管处于通态时的电流波形与相应时段的 u_d 波形相同。

6) 当 $\alpha=30^\circ$ 时

从 ωt_1 角开始把一个周期等分为 6 段，每段为 60° 与 $\alpha=0$ 时的情况相比，一周期中 u_d 波形仍由 6 段线电压构成，每一段导通晶闸管的编号等仍符合上表的规律。区别在于晶闸管起始导通时刻推迟了 30°，组成 u_d 的每一段线电压因此推迟 30°， u_d 平均值降低。晶闸管电压波形也相应发生变化。

7) 当 $\alpha=60^\circ$ 时

u_d 的波形中每段线电压的波形继续向后移， u_d 的平均值继续降低。当 $\alpha=60^\circ$ 时 u_d 出现了为零的点。

由以上分析可知，当 $\alpha \leq 60^\circ$ 时， u_d 波形均连续，对于电阻负载， i_d 波形与 u_d 波形的形状是一样的，也是连续的。

8) 当 $\alpha > 60^\circ$ 时

如 $\alpha=90^\circ$ 时电阻负载情况下，此 u_d 的波形每 60° 中有 30° 为零。由于是电阻性负载， i_d 的波形与 u_d 的波形一致，一旦 u_d 降至零， i_d 也降至零，流过晶闸管的电流即降至零；晶闸管关断，输出整流电压 u_d 为零，因为 u_d 的波形不能出现负值。

9) 参数计算

由于 $\alpha=60^\circ$ 是输出电压 u_d 波形连续和断续的分界点，输出电压平均值应分以下两种情况计算（式中， u_2 为变压器副边相电压）：

(1) $\alpha \leq 60^\circ$

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{2}\sqrt{3}u_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34u_2 \cos \alpha = 1.35u_{2L} \cos \alpha$$

当 $\alpha=0$ 时， $U_d=U_{d0}=2.34u_2$ 。

(2) $\alpha > 60^\circ$

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \sqrt{3}\sqrt{2}u_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34u_2 [1 + \cos(\pi/3 + \alpha)]$$

当 $\alpha=120^\circ$ 时， $U_d=0$ 。

4.3.3 逆变器

逆变器是把直流电转变成交流电的变流电路，是整流的逆过程。把直流电逆变为某一频率的交流电供给负载称为无源逆变；把直流电逆变为交流电反送到电网（或交流源）称为有源逆变。逆变器主要应用于各种高压输电、太阳能发电系统、交流电机调速、不间断电源、

感应加热电源等电力电子装置。

1. 逆变电路的基本工作原理

最基本的无源逆变器是单相桥式逆变器，其工作原理如图 4-40 所示。输入电压 U_d ，逆变器负载为电阻 R ，两者通过切换开关 $S_1 \sim S_4$ 联系起来，当奇数组开关 S_1 、 S_3 接通时，电流为 i_o 。如果断开奇数组开关而接通偶数组开关 S_2 、 S_4 时，负载电流大小仍为 i_o ，但方向相反。于是，奇数组开关和偶数组开关交替断开和闭合时，负载电阻 R 上就会得到交变电压 U_o 。这就相当于把直流电变成交流电供给负载电阻了。当以频率 f 交替切换奇、偶两组开关时，则负载电压为频率 f 的交变电压，它含有各次谐波，如果想获得正弦电压或电流，可以通过滤波器滤波来实现。

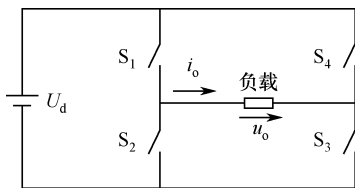


图 4-40 单相桥式逆变器工作原理示意图

2. 单相逆变器

1) 单相半桥电压型逆变电路

(1) 电路构成。

单相半桥电压型逆变电路原理如图 4-41 (a) 所示，它有两个桥臂，每个桥臂由一个可控器件和一个反并联二极管组成。在直流侧接有两个相互串联的足够大的电容，两个电容的连接点便成为直流电源的中点。负载连接在直流电源中点和两个桥臂连接点之间。

(2) 工作原理。

设可控开关器件 V_1 和 V_2 的栅极信号在一个周期内各有半周正偏，半周反偏，且两者互补。当负载为感性时，其工作波形如图 4-41 (b) 所示。输出电压 u_o 为矩形波，其幅值为 $U_m = U_d/2$ 。输出电流 i_o 波形随负载情况而异。

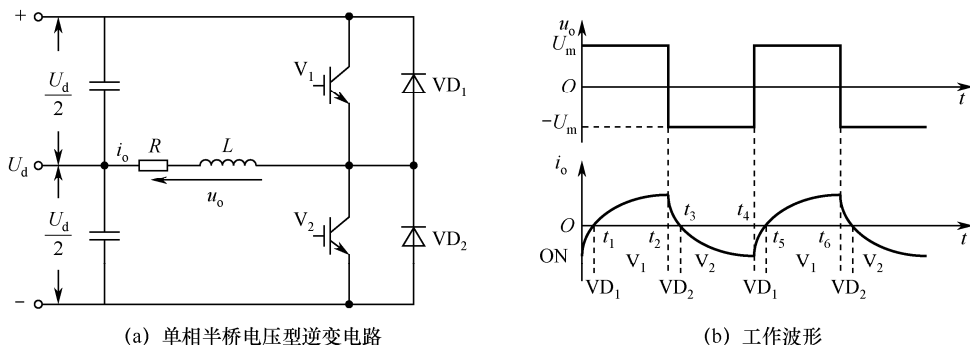


图 4-41 单相半桥电压型逆变电路及其波形

设 t_2 时刻以前 V_1 导通、 V_2 截止。 t_2 时刻给 V_1 关断信号，给 V_2 导通信号，则 V_1 关断，但感性负载中的电流 i_o 不能立即改变方向，于是 VD_2 导通续流。

当 t_3 时刻 i_o 降为 0 时, VD_2 截止, V_2 导通, i_o 开始反向。同样, 在 t_4 时刻给 V_2 关断信号, 给 V_1 开通信号后, V_2 关断, VD_1 先导通续流, t_5 时刻 V_1 才导通。各段时间内导通器件的名称标于图 4-41 (b)。

当 V_1 或 V_2 为通态时, 负载电流和电压同方向, 直流侧向负载提供能量; 而当 VD_1 或 VD_2 为通态时, 负载电流和电压反方向, 负载电感中储存的能量向直流侧反馈, 即负载电感将其吸收的无功能量反馈回直流侧。反馈回的能量暂时储存在直流侧电容器中, 直流侧电容器起着缓冲无功能量的作用。因为二极管 VD_1 、 VD_2 是负载向直流侧反馈能量的通道, 故称为反馈二极管; 又因为 VD_1 、 VD_2 起着使负载电流连续的作用, 因此又称为续流二极管。

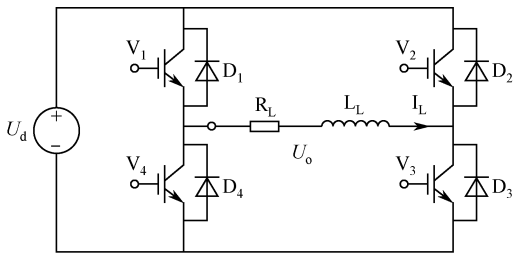
当可控器件不是门极可关断晶闸管时, 必须附加强迫换流电路才能正常工作。

半桥逆变电路的优点是简单, 使用器件少。其缺点是输出交流电压的幅值 U_m 仅为 $U_d/2$, 且直流侧需要两个电容器串联, 工作时还要控制两个电容器电压的均衡。因此, 半桥电路常用于几千瓦以下的小功率逆变电源。

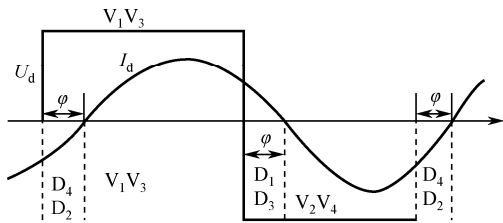
2) 单相全桥电压型逆变电路

单相全桥电压型逆变电路由两个半桥电路组成, 具体电路如图 4-42 (a) 所示。可控功率开关元件 V_1 与 V_4 互补, V_2 与 V_3 互补, 当 V_1 与 V_3 同时导通时, 负载电压 $U_o=+U_d$; 当 V_2 与 V_4 同时导通时, 负载两端 $U_o=-U_d$ 。 V_1 、 V_3 和 V_2 、 V_4 轮流导通, 负载两端就得到交流电能。

当电路带感性负载时, 负载电流相位落后电压相位 φ 电角度, 在 V_1 、 V_3 功率管栅极加上驱动信号时, 由于电流的滞后, 此时 D_1 、 D_3 仍处于导通续流阶段, 当经过 φ 电角度时, 电流过零, 电源向负载输送有功功率; 同样当 V_2 、 V_4 加上栅极驱动信号时 D_2 、 D_4 仍处于续流状态, 此时能量从负载馈送回直流侧, 再经过一个 φ 电角度后, V_2 、 V_4 才真正流过电流, 如图 4-42 (b) 所示。



(a) 电路原理图



(b) 波形图

图 4-42 单相全桥电压型逆变电路原理图及输出波形图

3) 单相桥式电流型逆变电路

电路构成: 单相桥式电流型逆变电路的原理图如图 4-43 所示。电路由四个桥臂构成, 每

个桥臂的晶闸管各串联一个电抗器 L_t ($L_{t1} \sim L_{t4}$)。电感 L_t 的作用是限制晶闸管开通时的电流上升率 di/dt ，各桥臂的 L_t 之间不存在互感。当使桥臂 VS_1 、 VS_3 和桥臂 VS_2 、 VS_4 以 2000Hz 的频率轮流导通时，就可以在负载上得到中频交流电。

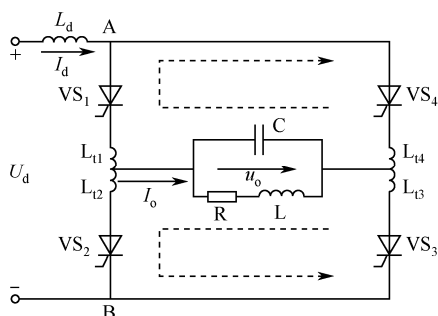


图 4-43 单相桥式电流型逆变电路原理图

该电路采用负载换相方式工作，要求负载电流的相位略超前于负载电压，即负载略呈容性。实际应用中，负载一般是电感线圈，用来加热置于线圈内的钢料。

图 4-43 中 R 和 L 串联即为感应线圈的等效电路。因为功率因数很低，故并联补偿电容 C 。电容 C 和 L 、 R 构成并联谐振电路。所以这种逆变电路也称为并联谐振式逆变电路。

负载换流方式要求负载电流相位超前于电压，因此补偿电容应使负载过补偿，使综合负载呈现容性。

电流型逆变电路的交流输出电流波形接近矩形波，其中包含基波和各奇次谐波，但谐波幅值远小于基波。基波频率接近负载电路谐振频率，故负载电路对基波呈现高阻抗，而对谐波呈现低阻抗，谐波在负载电路上产生的压降很小，因此负载电压的波形接近正弦波。

3. 三相逆变器

1) 三相电压型逆变电路

用三个单相逆变电路可以组成一个三相逆变电路。但在三相逆变电路中，应用最广的还是三相桥式逆变电路。电压型三相桥式逆变电路可以认为是由三个半桥逆变电路组成好，如图 4-44 所示。

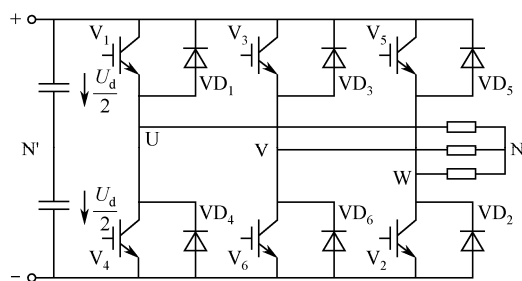


图 4-44 三相电压型桥式逆变电路

2) 工作原理

电路的直流侧通常只有一个电容器，但为了分析方便，画成串联的两个电容器并标出了

假想中点 N' 。三相电压型桥式逆变电路的基本工作方式和单相半桥、全桥逆变电路相同，也是 180° 导电方式，即每个桥臂的导电角度为 180° ，同一相上下两个臂交替导电，各相开始导电的角度依次相差 120° 。在任一瞬间都有三个桥臂同时导通。

在工作时，可能是上面一个臂和下面两个臂、也可能是上面两个臂和下面一个臂同时导通。因为每次换流都是在同一相上下两个桥臂之间进行的，因此也被称为纵向换流。

为了防止同一相上下两桥臂的开关器件同时导通而引起直流侧电源的短路，需要采取“先断后通”的方法，即先给应关断的器件关断信号，待其关断后留一定的时间裕量，然后再给应导通的器件发出导通触发信号，在两者之间留一个短暂的死区时间。死区时间的长短要视器件的开关速度而定，器件的开关速度越快，所留的死区时间越短。这个“先断后通”的措施与方法对于工作在上下桥臂通断互补方式下的其他电路也是适用的。

4.4 双向晶闸管

4.4.1 基本结构和工作原理

1. 常见双向晶闸管（见图 4-45）



图 4-45 双向晶闸管

2. 符号

(1) 文字符号：双向晶闸管的文字符号是 VS ，也有用 V 、 T 、 SCR 表示的。

(2) 图形符号：双向晶闸管的图形符号如图 4-46 所示。其中，(a) 为国标图形符号，(b) 为其他符号。

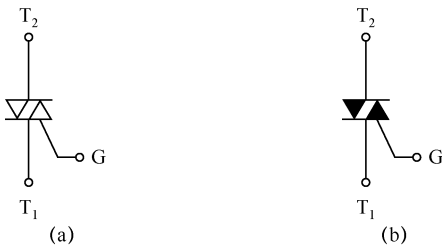


图 4-46 双向晶闸管的图形符号

3. 内部结构与等效电路

双向晶闸管的结构和等效电路如图 4-47 所示。

双向晶闸管是由 $NPNPN$ 五层半导体材料构成的，相当于两只普通晶闸管的反并联，它也有三个电极，分别是主电极 T_1 、主电极 T_2 和门极 G 。因该器件可以双向导通，故除门极 G 以外的两个电极统称为主端子，用 T_1 、 T_2 表示，不再划分成阳极或阴极。

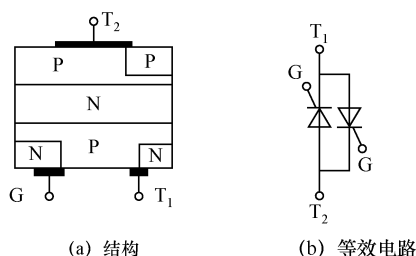


图 4-47 双向晶闸管的结构和等效电路

4. 工作原理

1) 极性确定

当双向晶闸管的G极和T₂极相对于T₁极的电压均为正时，T₂是阳极，T₁是阴极。反之，当G极和T₂极相对于T₁极的电压均为负时，T₁变成阳极，T₂为阴极。双向晶闸管由于正反向特性曲线具有对称性，所以它可在正反两个方向导通。

2) 触发与导通状态

双向晶闸管可以双向导通，即门极加上正或负的触发电压，均能触发双向晶闸管正反两个方向导通。其触发状态如图4-48所示。

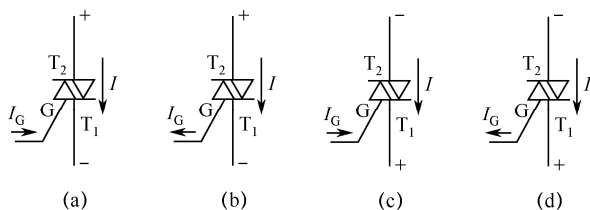


图 4-48 双向晶闸管的触发状态

3) 工作过程

当门极G和主电极T₂相对于主电极T₁的电压为正或门极G和主电极T₁相对于主电极T₂的电压为负时，晶闸管的导通方向为T₂→T₁。此时T₂为阳极，T₁为阴极。

当门极G和主电极T₁相对于主电极T₂为正或门极G和主电极T₂相对于主电极T₁为负时，则晶闸管的导通方向为T₁→T₂。此时T₁为阳极，T₂为阴极。

双向晶闸管的主电极T₁与主电极T₂间无论所加电压极性是正向还是反向，只要门极G和主电极T₁（或T₂）间加有正负极性不同的触发电压，满足其必需的触发电流，晶闸管就触发导通呈低阻状态。导通后，主电极T₁、T₂间的电压降约为1V左右。

4) 关断条件

双向晶闸管一旦导通，即使失去触发电压，也能继续维持导通状态。当主电极T₁、T₂电流减小至维持电流以下或T₁、T₂间电压改变极性，且无触发电压时，双向晶闸管阻断。只有重新施加触发电压，才能再次导通。

5. 特点及应用

双向晶闸管（又称双向可控硅）具有正反两个方向都能控制导通的特性，同时还具有触发电路简单、工作稳定可靠的优点，因而在交流调压、灯光调节、温度控制、无触点交流开关电路及交流电动机调速等领域得到广泛应用。

4.4.2 特性与参数

1. 伏安特性

双向晶闸管主电极伏安特性曲线如图 4-49 所示。该特性曲线由 I、III 两个象限内的曲线组合而成。第 I 象限的曲线说明当加到主电极上的电压使 T_1 对 T_2 的极性为正, 并且该电压值增大到等于转折电压 U_{DSM} 时, 双向晶闸管即行开通, 通态电流方向从第一主电极 T_1 流向第二主电极 T_2 。它的伏安特性与普通晶闸管伏安特性一致。

当加到主电极上的电压使 T_2 端对 T_1 端的极性为正时, 称为反向电压。在这个电压增大到转折电压值时, 双向晶闸管也被开通, 电流方向是从 T_2 端流向 T_1 端。这时特性曲线位于第 III 象限。因此, 双向晶闸管不管主电极电压特性如何, 也不管门极触发信号极性如何, 均可使其触发导通。这与普通晶闸管有显著不同。

图 4-49 双向晶闸管主电极伏安特性曲线

2. 主要参数

1)换向电流临界变化率 $(di/dt)_c$	<p>双向晶闸管是将两个反并联的晶闸管集成在一块硅片上的, 它们之间必然会相互影响, 即存在着换向问题。由于两个晶闸管共用一个主电极 T_1 端, 因而不论是在交流或变换为直流的情况下都将牵涉到换向问题。换向能力是双向晶闸管的一个特有参数。</p> <p>常用换向电流临界变化率用 $(di/dt)_c$ 来表示。为使双向晶闸管可靠运行, 必须要求器件具有很强的换向能力, 标准规定将 $(di/dt)_c$ 的值分为 0.2、0.5、1、2 四个等级。如对于 200A 的器件来说, 0.2 级的意思是: $(di/dt)_c=200\times0.2\%=0.4$ (A/μs)</p>
2)额定通态方均根电流 $I_T(RMS)$	<p>由于双向晶闸管工作在交流回路中, 因而和普通晶闸管不同, 不是用平均值而是用方均根值(有效值)来表示其额定电流。</p> <p>额定通态方均根电流是指在标准散热条件下, 当器件的单向导通角$\geq 170^\circ$ 时, 允许流过器件的最大交流正弦电流的方均根值, 用 $I_T(RMS)$ 表示。</p> <p>双向晶闸管方均根电流与普通晶闸管平均值电流之间的换算关系为</p> $I_{T(AV)}=(\sqrt{2}/\pi)I_{T(RMS)}$ <p>此外, 双向晶闸管的其他参数与普通晶闸管相似。</p>
3)双向晶闸管其他参数	双向晶闸管的其他参数见表 4-7。

表 4-7 双向晶闸管参数

类 型	参 数 值	类 型	参 数 值
标准型	额定通态电流 $I_T(RMS)=2.5\sim 40A$ 断态重复峰值电压 $V_{DRM}=50\sim 600V$ 最大门极触发电流 $I_{GT(MAX)}=25\sim 80mA$ 门极触发电压 $V_{GT}=1.5V$ 浪涌电流 $I_{TSM}=25\sim 300A$	灵敏门极型	$I_T(RMS)=2.5A$ $V_{DRM}=100\sim 500V$ $I_{GT(MAX)}=3$ 或 $4mA$
		零电压开关型	$I_T(RMS)=2.5\sim 40A$ $V_{DRM}=200\sim 600V$ $I_{GT(MAX)}=45mA$

4.4.3 交流调压

双向晶闸管由于其特有的触发控制特性，即在它的控制极上加正的或负的触发脉冲，都能使其导通，只要调节触发脉冲，就可改变双向晶闸管的导通角，相应地改变了负载上的交流电压，所以可以很方便地实现交流调压。

1. 电子调光台灯

1) 电路构成

电子调光台灯的电路原理图如图 4-50 所示。图中， R_p 为带开关的电位器， H 为白炽灯， VD 是双向二极管。

2) 工作过程

当开关 S 闭合后，市电 220V 经白炽灯泡、 L 、 R_p 、 R 对电容 C_2 充电；当 C_2 两端的电压上升到双向二极管的导通电压时， VD 导通，触发双向晶闸管 VS 导通，将市电与白炽灯泡接通，白炽灯泡点亮。

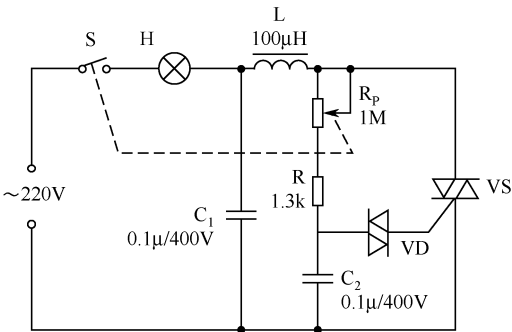


图 4-50 电子调光台灯电路

3) 调光原理

调节电位器 R_p 的阻值，改变 C_2 的充电速度，进而改变 VS 的导通角，即改变白炽灯泡两端的电压，起到调光作用。 R_p 阻值增大， C_2 的充电电流变小，两端间电压升高变慢， VS 触发时刻后延，白炽灯变暗； R_p 阻值减小，白炽灯变亮。

4) 抗干扰措施

为保证电路的可靠工作，抗干扰措施是必不可少的。图中的 L 和 C_1 是为抑制调光电路产生的射频干扰而设置的。

5) 应用

由于双向晶闸管组成的交流调压器具有结构简单、价格便宜、使用方便等特点，所以广泛应用于要求调光、调温、调速等场合。常见的有调光书写台灯、舞台调光、调温开关和调速器等。

2. 恒温箱温控器

1) 电路构成

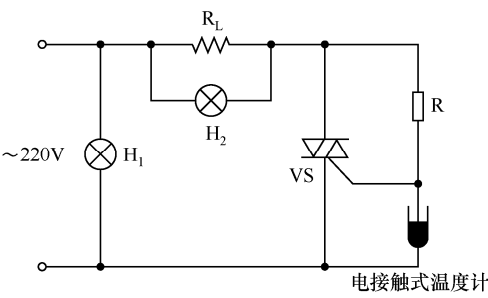


图 4-51 恒温箱温控器电路

恒温箱温控器电路如图 4-51 所示。它由双向晶闸管 VS 、电阻 R 、电接触式温度计等组成。图中， H_1 是电源指示灯，电路通电就亮，断电即灭； H_2 是工作指示灯，电阻丝通电加热就亮，电阻丝断电就灭； R_L 为加热电阻丝。

2) 工作过程

当恒温箱内的温度低于设定值时，电接触式温度计的电接触点断开，晶闸管 VS 经电阻 R 获得触发信号而导通，电热丝 R_L 通电，开始加热，指示

灯 H_2 亮。当恒温箱内的温度上升到设定温度以上时，电接触式温度计的电接触点接通，双向晶闸管的 T_1 - G 极间短接， VS 失去触发信号、进入截止状态，电热丝 R_L 断电，停止加热， H_2 指示灯熄灭。

- 3) 控温原理
- 双向晶闸管的开与关，控制电热丝中电流的有无。上述过程反复进行，使得恒温箱内的温度趋向于动态恒定。
- 4) 电接触式温度计
- 这类温度计具有测温 and 控温两种功能。在本应用中，温度计的电触点串接在触发电路中，触点断开，电阻丝通电加热；触点闭合，加热停止。
- 5) 控温精度
- 由于采用的是“开、关”控制方式，控温精度较差。对温度精度要求高的场合不适用。

4.5 开关晶闸管与晶闸管开关电路

4.5.1 开关晶闸管

开关晶闸管（也称硅控制开关管、四端小功率晶闸管、硅控制开关、可控硅开关、四极晶闸管，缩写 SCS）是一种由 PNPN 四层半导体材料构成的多功能半导体器件。只要改变接线方式，就可以用它构成普通晶闸管、门极可关断晶闸管、逆导晶闸管、互补型 N 门极晶闸管（NGT）、单结晶体管以及 NPN 型晶体管、PNP 型晶体管、稳压二极管、N 型或 P 型负阻器件等，可分别实现十多种半导体器件的电路功能。

1. 符号
- (1) 文字符号：开关晶闸管的文字符号为 VS 或 SCS 。

(2) 图形符号：电路图形符号如图 4-52 所示。

2. 结构

开关晶闸管内部结构和等效电路如图 4-53 所示。

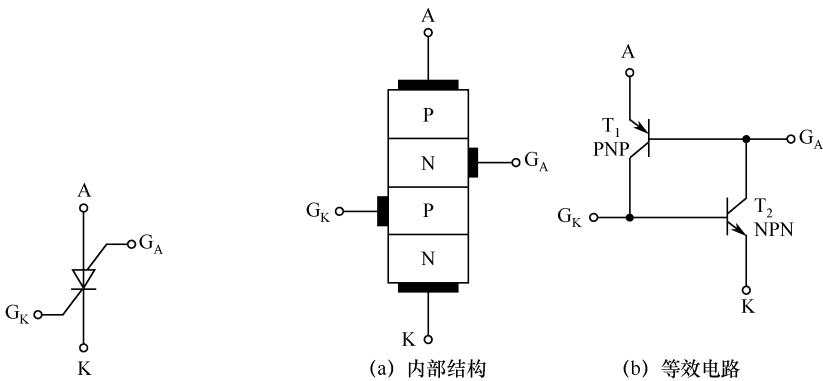


图 4-52 图形符号

图 4-53 开关晶闸管内部结构和等效电路

开关晶闸管在 PNPN 结构的每一层都有一个引出端，每个引出端作为一个电极，分别是

阳极 A、阴极 K、阳极控制极 G_A 和阴极控制极 G_K 。若将开关晶闸管的阳极控制极 G_A 空着不用，就可以代替普通晶闸管或门极可关断晶闸管使用；若将其阴极控制极 G_K 空着不用，则可以代替门极关断晶闸管、单结晶体管使用；若将其阳极门极 G_A 与阳极 A 短接，则可以代替逆导晶闸管或 NPN 型硅晶体管使用。

3. 性能特点

1) 接线灵活	开关晶闸管的最大特点是在 PNP 的每一层都有一个引出端，使用极灵活。在不同接线方式下，硅控制开关的电路功能详见表 4-8，除表中所列用途之外，硅控制开关还可用作继电器驱动器、延时电路、脉冲发生器、双稳态触发器、高灵敏度电平检测器等。
2) 控制与触发的灵敏度高	门极触发电流极小（几微安），开关时间（ t_{ON} 、 t_{OFF} ）极短，其典型值通常在 $1\sim 10\mu s$ ；而 SCR 的开关时间一般在 $5\sim 30\mu s$ 。相当于一只高灵敏度的小功率晶闸管。
3) 可作为 GTO 使用	开关晶闸管作为 GTO 使用时，A 极接电源正极，K 极接电源负极； G_A 极加负脉冲时器件导通，加正脉冲时关断； G_K 极加正脉冲时器件导通，加负脉冲时器件关断。
4) 低功率小电流	开关晶闸管的容量一般小于 6V、0.5A，大多采用金属壳封装。在额定功耗为 $100\sim 500mW$ 时，额定阳极电流的典型值为 $100\sim 300mA$ 。典型产品有 3N58、3N81、3SF11、MAS32 等。

4. 工作原理

在图 4-53（b）中，阳极控制极 G_A 加负脉冲时， T_1 晶体管导通；导通的 T_1 为 T_2 提供基极电流，晶体管 T_2 也导通。同理，当阴极控制极 G_K 加正脉冲时， T_2 晶体管导通；导通的 T_2 为 T_1 提供基极电流，晶体管 T_1 也导通。 T_1 和 T_2 都导通，SCS 就处于导通状态。

当在阳极控制极 G_A 加正脉冲或在阴极控制极 G_K 加负脉冲时，SCS 就会截止。

5. 特性曲线

开关晶闸管（SCS）的伏安特性与普通晶闸管（SCR）相似，其特性曲线如图 4-54 所示。随着正向工作电压 U_F 的增高，电流开始缓慢地增大至图中 A 点；电压继续升高时，电流快速升至图中 B 点；由于 $\beta_1\beta_2$ 大于 1，所以 SCS 立即导通；其中 $\beta_1\beta_2$ 分别为 T_1 、 T_2 的电流放大系数。

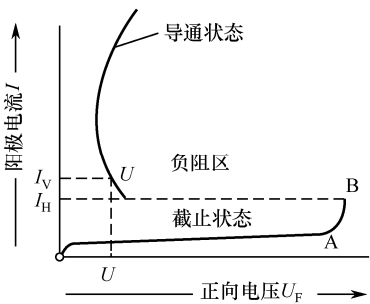


图 4-54 开关晶闸管伏安特性曲线

如果阳极加有电压，SCS 可瞬间导通，电流急剧增大。SCS 进入导通状态后电流快速增加，电流的大小由器件内部的串联电阻决定。此时，SCS 呈现负阻特性。

6. 应用

SCS 的应用领域主要有计算机中的计数器、寄存器、计时电路、电压感测电路、脉冲发生器、振荡器等。

7. 可构成的电路功能

开关晶闸管电路功能见表 4-8。

8. 检测

1) 电极判定	开关晶闸管多采用金属壳封装，看引脚排列底视图。从管键（管壳上的凸起处）开始，按顺时针方向依次为阴极 K、阴极控制极 G_K 、阳极控制极 G_A 、阳极 A。
2) 检查 PN 结的单向导电性	将万用表置于 $R \times 1k\Omega$ 挡，分别测量各极间（A- G_A 、 G_A - G_K 、 G_K -K）的正反向电阻。正向电阻应为几千欧至十几千欧，反向电阻趋于无穷大，说明 PN 结具有单向导电性。
3) 逆导性（反向导通性能）检测	<p>分别将晶闸管的阳极 A 与阳极控制极 G_A、阴极 K 与阴极控制极 G_K 短接后，则 A、K 间有两个同极性并联着的硅 PN 结，且 K 极是 PN 结的正极，A 极是 PN 结的负极。</p> <p>将万用表置于 $R \times 1k\Omega$ 挡，黑表笔接 A 极，红表笔接 K 极，正常时阻值应为无穷大；用黑表笔接 K 极，红表笔接 A 极，测出的是正向电阻，阻值约为几千欧。该特性就称为逆导（即反向导通）。</p>
4) 触发能力检测	<p>将万用表置于 $R \times 1k\Omega$ 挡，用黑表笔接阳极 A，红表笔接阴极 K，电阻趋于无穷大，表明开关晶闸管处于关断状态。</p> <p>（1）在黑表笔接 A 极、红表笔接 K 极情况下，用红表笔尖碰一下 G_A 极，随后脱开，相当于给 G_A 极加负触发脉冲。若电阻迅速由无穷大变为低阻值，则说明器件的 G_A 极具有良好的触发能力。</p> <p>（2）在黑表笔接 A 极、红表笔接 K 极情况下，用黑表笔尖碰一下 G_K 极，随即脱开，相当于给 G_K 极输入正触发脉冲。若电阻值迅速由无穷大变为低阻值，则可判定该晶闸管 G_K 极的触发能力良好。</p> <p>两个控制极 G_A、G_K 皆具有良好的触发能力，表明开关晶闸管的触发能力正常。</p>
5) 关断能力检测	<p>（1）在开关晶闸管处于导通状态时，用黑表笔尖碰一下 G_A 极后随即拿开，即将阳极 A 与阳极控制极 G_A 瞬间短路，A、K 极之间的电阻值由低阻值变为无穷大，则说明被测晶闸管的 G_A 关断性能良好。</p> <p>（2）在器件处于导通状态时，用红表笔尖碰一下 G_K 极后，随即拿开，即将 G_K 极和 K 极瞬间短路，若电阻读数由低阻值变为无穷大，说明 G_K 极具有关断能力。</p> <p>G_A、G_K 两个极皆具有关断能力时，表明 SCS 的关断能力正常。</p>
6) 判断好坏 将万用表置于 $R \times 1k$ 挡，分别测量开关晶闸管电极 A- G_A 、 G_A - G_K 、 G_K -K 之间的正向、反向电阻值。	<p>（1）正常时，阳极 A 与阳极控制极 G_A 之间的正向电阻值（黑表笔接 A 极）为无穷大，反向电阻值为 $4 \sim 12k\Omega$；阳极控制极 G_A 与阴极控制极 G_K 之间的正向电阻值（黑表笔接 G_A）为无穷大，反向电阻值为 $2 \sim 10k\Omega$；阴极 K 与阴极控制极 G_K 之间的正向电阻值（黑表笔接 K）为无穷大，反向电阻值为 $4 \sim 12k\Omega$。</p> <p>（2）如果测得上述三个极间的正反向电阻值均较小或均为无穷大，则说明该开关晶闸管内部短路或开路。</p> <p>（3）如果将 K、G_A 极、A、G_K 极短路时，A、K 极之间的正反向电阻值为无穷大，说明该开关晶闸管内部开路损坏或性能不良。</p>

表 4-8 开关晶闸管电路功能表

序号	接线方式	电路功能	对应引脚	主要特点
1	G_A 开路	普通晶闸管 (SCR)	G_K, A, K (G, A, K)	高灵敏度晶闸管, K 门极触发电流仅几微安
2		可关断晶闸管 (GTO)	G_A, G_K, A, K (G, A, K)	用 $G_A、G_K$ 端均可控制 GTO 的导通与关断
3	G_A 与 A 短接	逆导晶闸管 (RCT)	G_K, A, K (G, A, K)	其正向特性与普通晶闸管相同, 反向特性与硅整流二极管的正向特性相似
4	G_K 开路	可编程单结晶体管 (PUT)	G_A, A, K (G, A, K)	外接可调式分压电阻器 $R_1、R_2$, 分压比 η_V 固定
5	G_K 开路	单结晶体管 (UJT)	G_A, A, K (E, B_2, B_1)	外接固定式分压电阻器 $R_{B1}、R_{B2}$, 分压比 η_V 固定
6	G_A 与 A 短接	NPN 型硅晶体管 (T_1)	A, G_K, K (C, B, E)	利用万用表可测出其电流放大系数 h_{FE1}
7	G_K 与 K 短接	PNP 型硅晶体管 (T_2)	A, G_A, K (E, B, C)	利用万用表可测出其电流放大系数 h_{FE2}
8	$G_A、G_K$ 开路	肖克莱二极管 (SKD)	A, K ($+, -$)	可控半导体整流二极管
9	$G_K、K$ 开路	稳压二极管 (D_{Z1})	A, G_A ($+, -$)	稳定电压: $U_{Z1}=90V$ (典型值)
10	$A、K$ 开路	稳压二极管 (D_{Z2})	G_K, G_A ($+, -$)	稳定电压: $U_{Z2}=80V$ (典型值)
11	$A、G_A$ 开路	稳压二极管 (D_{Z3})	G_K, K ($+, -$)	稳定电压: $U_{Z3}=4V$ (典型值)

4.5.2 硅开关

1. 硅单向开关

硅单向开关 (又称单向触发晶体管, 简称 SUS) 是新型触发器件。三个引出端分别是阳极 A 、阴极 K 、门极 G , 如图 4-55 (a) 所示。硅单向开关实质上是由稳压管控制的互补型 N 门极晶闸管构成的电路。典型产品有 US08A 等, 外形同塑封晶体管。

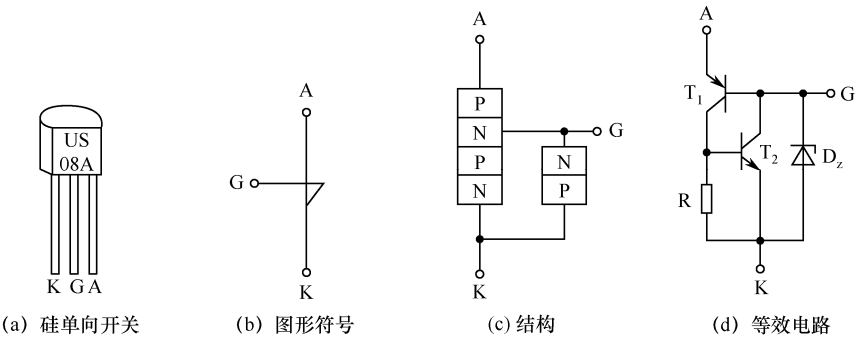
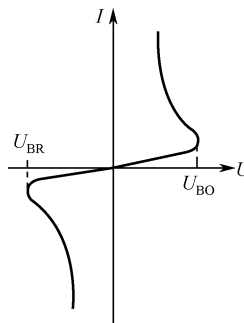


图 4-55

1) 图形符号 硅单向开关的图形符号如图 4-55 (b) 所示。		
2) 结构和等效电路 硅单向开关的结构和等效电路如图 4-55 (c) 与 (d) 所示。		
3) 特点		(1) 从电路图可以看出, 其内含的稳压二极管并联在门极与阴极之间, 稳压值为 6~10V。导通过程首先将稳压管反向击穿, 然后晶闸管才导通, 导通后 A-K 极间的正向压降迅速降到通态电压 U_{ON} 。
		(2) 开关的正反向转折电压不对称, 但满足关系式 $U_{BR} > U_{BO} \geq U_{ON}$ 。通态压降只有零点几伏, 通态电阻仅 2Ω 左右。
		(3) 开关特性好, 导通时间仅 $0.2\mu s$ 左右。
4) 特性曲线 硅单向开关的伏安特性曲线如图 4-56 所示。图中, U_{BR} 为反向转折电压, U_{BO} 为正向转折电压, U_{ON} 为通态电压 (或导通电压)。		
5) 应用		硅单向开关主要用于晶闸管移相电路, 也能构成振荡器、组成温度越限报警器、直流电机调速器等。
6) 检测	(1) 判定门极 G	由图 4-55 (c) 可见, 在 A-G、K-G 之间分别有一个 PN 结, 根据对称性很容易识别门极。将万用表置于 $R \times 100$ 挡, 拿红表笔接某一脚, 用黑表笔依次碰触其他两脚, 如这两次测出的电阻值都是几百欧姆, 而在交换表笔之后电阻值均变成无穷大, 说明开始红表笔接的是门极 G。
	(2) 识别阳极 A 和阴极 K	先设定一个引脚为 A 极, 另一引脚是 K 极, 然后测出正向通态电压 U_{ON} 和反向转折电压 U_{BR} 。如果 $U_{ON} \ll U_{BR}$, 证明设定是对的。

2. 硅双向开关

1) 图形符号和等效电路 硅双向开关 (也称双向触发晶体管, 简称 SBS) 相当于把两只硅单向开关反极性并联, 其图形符号和等效电路如图 4-57 所示。		
		图 4-57 图形符号与等效电路

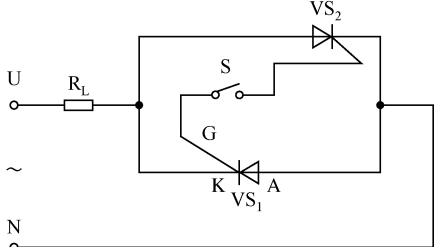
<p>2) 特性</p> <p>硅双向开关的正向特性及用途与硅单向开关相同,且正反向转折电压的对称性很好(偏差小于 0.2V)。其伏安特性曲线如图 4-58 所示。图中, U_{BO} 为正向转折电压, U_{BR} 为反向转折电压。</p>	 <p>图 4-58 硅双向开关伏安特性曲线</p>
<p>3) 检测</p> <p>实例：被测硅双向开关的型号为 BS08A。</p> <p>选 500 型万用表 R\times100 挡测得引脚③—②、①—②间的电阻分别为 820Ω 和 830Ω。由此可确定②(中间引脚)为门极。再分别测出 U_{BO}=8.35V, U_{BR}=8.2V, 二者仅相差 0.15V, 说明对称性很好。</p>	<p>(1) 确定门极 G：利用万用表确定门极 G 的方法与硅单向开关相同。</p> <p>(2) 确定 A₁、A₂：由于双向开关的 A₁、A₂ 极在结构上完全对称,无须区分,可互换使用。</p> <p>(3) 对称性检测：利用兆欧表和万用表相配合,分别测出 U_{BO}、U_{BR}, 最后比较二者之差。差值越小,对称性越好。</p>

4.5.3 晶闸管开关电路

晶闸管开关电路由于简单、快捷、经济、方便、无触点、大功率等而得到了广泛应用。通常在晶闸管门极需串接限流电阻。对 220V 交流电,一般取几百欧至 5k Ω 之间,功率在 2W 以上。门极接通时,晶闸管导通;门极断开时,交流电过零,晶闸管关断。

1. 交流无触点开关

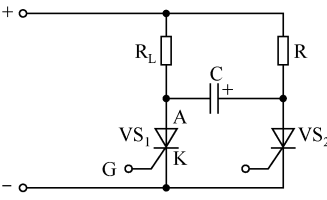
交流无触点开关电路如图 4-59 所示。

<p>1) 电路原理图</p> <p>图中, U、N 间加交流电压, R_L 是负载电阻, S 为开关, VS₁、VS₂ 两个晶闸管反向并联。</p>	 <p>图 4-59 交流无触点开关电路</p> <p>单向晶闸管 K-G 极间的电阻通常为 300~500Ω。</p>
<p>2) 工作原理</p>	<p>(1) 当电路中的开关 S 闭合后,在交流电的正半周,电路经 VS₁ 的 K-G 极间直流电阻向 VS₂ 提供触发电压和电流,并使其导通,交流电自 U 端经 R_L、VS₂ 流向 N 端。由于是阻性负载,电路中的电压、电流同相位。当交流电压、电流过零时,流过 VS₂ 中电流因小于维持电流而由导通状态变为截止状态。</p>

2) 工作原理	<p>(2) 在交流电的负半周, 如果开关 S 闭合, 电路经晶闸管 VS_2 的 K-G 极间直流电阻向 VS_1 提供触发电压和电流, 并使其导通, 交流电自 N 端经 VS_1、R_L 流向 U 端。当交流电压、电流过零时, 流经 VS_1 电流因小于其维持电流而由导通状态变为截止状态。</p> <p>(3) 只要开关 S 闭合, 晶闸管 VS_1 和 VS_2 便互相触发并交替导通与截止, 使交流电得以流通, 负载获得需要的电压和电流。当开关 S 断开时, 晶闸管得不到触发电压与电流, 交流电路也就被切断。</p>
3) 特点与应用	<p>(1) 特点: 无触点交流开关电路仅需要几毫安的电流流过开关 S, 就能控制几百安、上千伏的大功率电路, 而且无火花, 动作迅速。</p> <p>(2) 应用: 特别适合在需要防火、防爆等场合下使用。</p>

2. 直流无触点开关

直流无触点开关电路如图 4-60 所示。

1) 电路原理图	 <p>图 4-60 直流无触点开关电路</p>
2) 工作原理	<p>当触发信号加在单向晶闸管 VS_1 上并使其导通, 负载 R_L 上则有电流流过, 电容 C 经 R 及 VS_1 充电, 两端间电压升高, 极性如图所示。当要关断单向晶闸管 VS_1 时, 可触发晶闸管 VS_2 并使其导通。此时电容 C 两端的电压经 VS_2 加在 VS_1 的 A-K 两端, 因电压极性对 VS_1 来说是反向的, VS_1 就因承受反向电压而被关断。</p> <p>在电路中, 只要使用两个较弱信号去触发 VS_1 及 VS_2 就可以控制大电流在负载 R_L 中的流通与关断, 实现无触点开关的作用。</p>
3) 应用	<p>直流无触点开关除可以用来控制大功率直流电路的通断外, 还可以利用触发脉冲的移相技术得到调宽的矩形波电压, 达到调节直流电压大小的目的。由于矩形波含有大量高次谐波, 实际应用受到很大限制。</p>

3. 晶闸管直流斩波器

1) 电路构成	<p>图中, 门极可控晶闸管 VS 与电容 C、电感 L_1 和 L_2、二极管 VD 共同组成电力电子开关, L_p 为滤波电感, VDR 为续流二极管。直流电源 U 通过上述斩波电路为直流电动机 M 供电。</p>
---------	--

图 4-61 晶闸管定宽调频型斩波器主电路原理图

2) 工作原理	给晶闸管 VS 外加需要的触发信号使之导通。经过一段时间的延时后，在辅助电路的作用下 VS 自行关断。由于电子开关的导通时间固定，所以斩波器输出脉冲的宽度一定，因此称为“定宽”；调节晶闸管触发脉冲的间隔时间，可以得到不同频率的输出脉冲。这就是“调频”。占空比的调节是通过改变触发脉冲间隔来实现的，所以不同的触发脉冲间隔对应着不同的输出电压。
3) 应用	在一些大功率的直流斩波器中可用晶闸管做电子开关，特别是在直流驱动的无轨电车、工矿牵引电机车等上，晶闸管直流斩波器大量地被使用。

4.6 其他晶闸管

4.6.1 门极可关断晶闸管

1. 门极可关断晶闸管

门极可关断晶闸管（也称门极可控晶闸管、门控晶闸管，简称 GTO）是晶闸管的一个衍生器件，可以通过门极施加负的脉冲电流使其关断，属于全控型器件，如图 4-62 所示。



图 4-62 门极可关断晶闸管

2. GTO 的图形符号（见图 4-36（a））

3. GTO 的结构和等效电路

GTO 的内部结构和等效电路如图 4-63（b）、（c）所示。

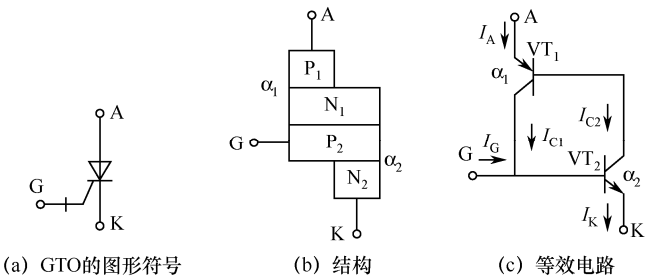
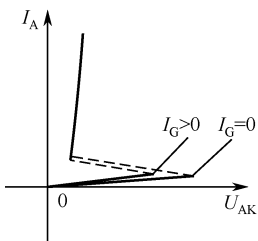


图 4-63 GTO 内部结构和等效电路

GTO 是 PNP 四层半导体结构，外部引出阳极 A、阴极 K 和门极 G，是一种多元功率集成器件。虽然外部同样引出三个极，但内部包含数十个甚至数百个共阳极的小 GTO 单元，这些 GTO 单元的阴极和门极在器件内部也是并联的。

4. GTO 的工作原理

从图 4-63 可知，GTO 由 PNP 型 VT₁ 和 NPN 型 VT₂ 两个三极管构成。两个三极管组成电流正反馈结构，其电流放大系数分别设为 α_1 和 α_2 。



- (1) 当 $\alpha_1+\alpha_2=1$ 时，是器件的临界导通条件。
- (2) 当 $\alpha_1+\alpha_2>1$ 时，是器件的饱和导通条件。
- (3) 当 $\alpha_1+\alpha_2<1$ 时，是器件的关断条件。

5. 伏安特性

GTO 的伏安特性如图 4-64 所示。图中， I_A 为阳极电流， U_{AK} 为加在阳极与阴极间的电压， I_G 为门极电流。从图中不难看出，门极电流大，转折电压低。当 U_{AK} 大于转折电压后，GTO 呈现负阻特性。

6. 主要参数

1) 时间参数	<p>(1) 开通时间 (T_{on}): 开通时间是指延迟时间与上升时间之和。GTO 的延迟时间一般为 $1\sim2\mu s$，上升时间则随通态阳极电流值的增大而增大。</p> <p>(2) 关断时间 (T_{off}): 关断时间是指存储时间与下降时间之和，而不包括尾部时间。GTO 的存储时间随阳极电流值的增大而增大，下降时间一般小于 $2\mu s$。</p> <p>(3) 储存时间 (t_s): 储存时间是指消除饱和导通时储存的大量载流子，使等效晶体管退出饱和状态需要的时间。门极负脉冲电流幅值越大，前沿越陡，所储存载流子的消散速度越快，t_s 越短。</p> <p>(4) 下降时间 (t_f): 下降时间是指等效晶体管从饱和状态进入放大状态、使阳极电流逐渐减小需要的时间。</p> <p>(5) 尾部时间 (t_l): 尾部时间是指残存载流子复合需要的时间。通常 t_l 比 t_s 小得多，而 t_l 比 t_s 要长。门极负脉冲的后沿缓慢衰减，在 t_l 阶段仍保持适当负电压，则可缩短尾部时间。</p>
2) 参数表	通态峰值电压、最大可关断阳极电流、门极触发电流等参数见表 4-9。

7. 特点及应用

1) 特点	<p>(1) 门极可关断晶闸管耐压高、电流大，具有自关断能力，是理想的高压、大电流开关器件。GTO 容量已达到 3000A、4500V。</p> <p>(2) 内部三极管 VT₂ 控制更灵敏，GTO 可以很容易关断。</p> <p>(3) 保持$\alpha_1+\alpha_2$ 在 1.05 上下，使 GTO 导通时的饱和程度不深，接近临界饱和状态，为 GTO 的控制提供了有利条件，加快了开通过程，增强了电压承受能力。</p> <p>(4) 集成结构中每个 GTO 单元的阴极面积小，大大缩短了门极和阴极间的距离，使门极可流过较大电流。</p>
2) 应用	广泛用于斩波器、变频调速、逆变电源等领域。

8. 检测

1) 判定 GTO 的电极	将万用表置于 $R\times 1$ 挡, 测量任意两引脚间的电阻, 当黑表笔接 G 极, 红表笔接 K 极时, 电阻呈低阻值; 其他情况电阻值均为无穷大。由此可迅速判定 G、K 极, 剩下的是 A 极。
2) 检查触发能力	(1) 先将万用表置于 $R\times 1k$ 挡, 黑表笔接 A 极, 红表笔接 K 极, 电阻为无穷大。
	(2) 在黑表笔接 A 极、红表笔接 K 极的情况下, 用黑表笔尖同时接触 G 极, 即为 G 加上正向触发信号, 表针向右偏转到低阻值即表明 GTO 已经导通。
	(3) 黑表笔离开 G 极, 只要 GTO 维持导通状态, 说明被测管具有良好的触发能力。
3) 检查关断能力	(1) 采用双表法检查可关断晶闸管 GTO 的关断能力, 表 I 的 (黑表笔接 A 极, 红表笔接 K 极) 的挡位及接法保持不变。
	(2) 将表 II 置于 $R\times 10$ 挡, 红表笔接 G 极, 黑表笔接 K 极, 即给 G 极施加负的触发信号, 如果表 I 的指针向左摆到无穷大位置, 说明 GTO 具有良好的关断能力。

表 4-9 可关断晶闸管电特性参数

参数名称	符号	单位	数 值		
最大可关断阳极电流	I_A	A	5	10	200
通态峰值电压	U_{TM}	V	<3.0	<3.0	<3.0
反向重复峰值电流	I_{RRM}	mA	≤ 4	≤ 6	≤ 30
断态重复峰值电流	I_{DRM}	mA	≤ 4	≤ 6	≤ 30
维持电流	I_H	mA	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 10
擎住电流	I_L	A	≤ 1.0	≤ 1.0	≤ 10
门极触发电流	I_{GT}	mA	≤ 100	≤ 150	≤ 1000
门极触发电压	U_{GT}	V	≤ 1.5	≤ 1.5	≤ 1.5
门极不触发电压	U_{GD}	V	≥ 0.5	≥ 0.5	≥ 0.5
门极关断电流	I_{GQ}	A	≤ 1.0	≤ 2.0	≤ 65
门极关断电压	U_{GQ}	V	≤ 18	≤ 18	≤ 20
开通时间	T_{on}	μs	≤ 3.0	≤ 3.5	≤ 10
关断时间	T_{off}	μs	≤ 5	≤ 8	≤ 15
断态电压临界上升率	du/dt	V/ μs	$\geq 100, \geq 200, \geq 500$	$\geq 100, \geq 200 \geq 500$	$\geq 200, \geq 500, \geq 800, \geq 1000$
结壳热阻	R_{jc}	Ω/W	≤ 4.0	≤ 3.0	≤ 0.4

4.6.2 逆导晶闸管

1. 典型逆导晶闸管

典型逆导晶闸管 (又称反向导通晶闸管, 简称 RCT) 是将普通晶闸管和快速整流二极管反并联制作在同一硅片上的集成器件。它有 3 个引脚, 分别为阳极 A、阴极 K 和门极 G, 如图 4-65 所示。

2. 符号

1) 文字符号

逆导晶闸管的文字符号为 VS、RCT。

2) 图形符号

图形符号如图 4-66 所示。

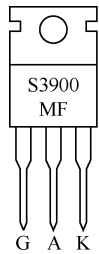


图 4-65 逆导晶闸管

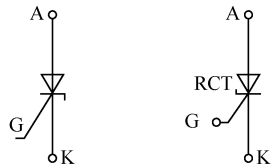


图 4-66 逆导晶闸管图形符号

3. 结构

由于晶闸管部分采用阴极短路和阳极短路结构，使晶闸管的正向转折电压比单只普通晶闸管要高。二极管部分采用电子辐照或向半导体内掺金以减小载流子寿命，使之具有快速恢复特性。

逆导晶闸管是普通晶闸管 and 二极管反并联的集成器件。左侧为晶闸管，右侧是二极管，两者之间为隔离区。隔离区一般采用电子辐照或挖槽等方法，以阻止载流子的横向扩散。

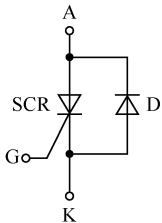


图 4-67 等效电路

4. 等效电路

逆导晶闸管的等效电路如图 4-67 所示。由于逆导晶闸管是把普通晶闸管和快速二极管集成在一起制成的，所以其等效电路如图 4-67 所示。图中，SCR 为普通晶闸管，D 为快速二极管。

5. 工作原理

逆导晶闸管需要正的 门极触发信号使其导通。在逆导晶闸管电路中，晶闸管与二极管是交替工作的，晶闸管通过正向电流，二极管通过反向电流，隔离区用来削弱或消除两者交替工作时带来的影响。

逆导晶闸管中的晶闸管部分通态平均电流和二 极管部分通态平均电流的比值根据实际应用情况来确定，它的换流能力由换向电流临界下降率和重加电压临界上升率决定，它的重加电压上升率一般比普通晶闸管低。

(1) 静态特性。

在阳极和阴极间加正电压情况下，如果门极无电压，阳极电压又小于正向转折电压时，RCT 处于阻断状态；如果在门极也加正电压，RCT 可在阳极电压低于转折电压时就可以触发导通。

逆导晶闸管的正向导通与晶闸管相同，反向导通与快速二极管一样。所以逆导晶闸管的稳态特性与由单只晶闸管和单只二极管反并联电路的特性差别很小。

(2) 动态特性。

在 RCT 中，晶闸管与二极管反并联，彼此间存在着相互影响。当二极管因正偏压转为关断时，会产生小的晶闸管门极电流；如果此时晶闸管部分加正向偏压，会导致误导通。

(3) 在正向阻断状态下，二极管处于反向，只有当电压上升到雪崩电压时，逆导晶闸管才由阻断状态进入导通状态。

6. 逆导晶闸管伏安特性曲线

逆导晶闸管的伏安特性具有不对称性, 正向特性表现为晶闸管的正向伏安特性, 反向特性表现为二极管的正向特性(但坐标位置不同)。其伏安特性曲线如图 4-68 所示。

7. 主要参数

逆导晶闸管的典型产品型号为 S3900MF, 其主要参数如下。

额定电压(即断态重复峰值电压) U_{DRM} 大于 750V。额定电流(即通态平均电流) $I_{\text{T(AV)}}$ 为 5A。导通电压(即最大通态电压) U_{T} 为 3V。最大反向导通电压 U_{TR} 小于 0.8V。最大门极触发电压 U_{GT} 为 4V。最大门极触发电流 I_{GT} 为 40mA。关断时间 t_{off} 为 2.4 μs 。通态电压临界上升率 du/dt 为 120V/ μs 。通态浪涌电流 I_{TSM} 为 80A。

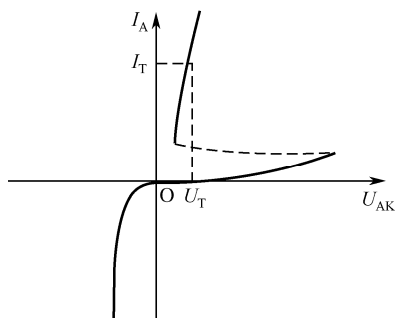


图 4-68 逆导晶闸管伏安特性曲线

8. 逆导晶闸管的特性

(1) 逆导晶闸管的晶闸管部分的断态重复峰值电压高, 关断时间短, 正向压降小, 高温特性好, 允许结温可达 150℃ 以上。

(2) 晶闸管、二极管两元件集成使电路的接线电感减小, 使换向电路小型、轻便。

(3) 开关速度快。

(4) 在负的阳极电压作用下无开关作用, 反向时能通过大电流。

(5) 正向转折电压比普通晶闸管的高。

9. 特点及应用

1) 特点

正是逆导晶闸管的这种特殊电路结构, 使它具有耐高压、耐高温、关断快、通态电压低等优良性能。通常逆导晶闸管的关断时间仅几微秒, 工作频率达几十千赫, 优于快速晶闸管(FSCR)。

2) 应用

逆导晶闸管多用于逆变电路、斩波电路、开关电源、UPS 不间断电源、机动车稳压器等需要将晶闸管和二极管反并联的场合。

4.6.3 快速晶闸管

1. 常见快速晶闸管

快速晶闸管(简称 FSCR)是可以在 400Hz 以上频率工作的晶闸管, 如图 4-69 所示。其符号与普通晶闸管相同。它不仅有良好的静态特性, 更有良好的动态特性。



图 4-69 快速晶闸管

2. 工作原理

快速晶闸管的结构和工作原理与普通晶闸管相同，但在设计与制造中采取了特殊措施以减少开关耗散功率、提高 dI/dt 和 dU/dt 的耐受力、缩短关断时间。

(1) 快速晶闸管承受反向阳极电压时，不管门极施加什么电压，晶闸管都处于关断状态。

(2) 器件承受正向阳极电压、门极也施加正向电压时才导通。

(3) 在导通情况下，只要有一定的正向阳极电压，不管门极施加正电压还是负电压，晶闸管都继续保持导通，即门极失去控制作用。

(4) 在导通情况下，当阳极电压减小到接近于零或阳极电流小于维持电流时，晶闸管恢复关断状态。

3. 高频晶闸管

高频晶闸管是指对工作频率高、满足特定需要、且有明确标定的快速晶闸管。例如 KG50 (20kHz)，表示该晶闸管的标称工作频率为 20kHz，通态平均电流为 50A (20kHz 下，正弦半波平均电流值)。其工作原理和快速晶闸管相同。

4. KK 系列器件技术参数

KK 系列晶闸管型号的主要参数见表 4-10。

5. 特点及应用

1) 特点

快速晶闸管具有耐压高、开通损耗小、开通速度快、关断时间短、通态电流临界上升率 (dI/dt) 及断态电压临界上升率 (dU/dt) 高等特点，在额定频率内其额定电流不随频率的增加而显著下降。

2) 应用

快速晶闸管主要用于整流器、斩波器、逆变器、变频器、脉宽调制、调速等中高频大功率控制电路。

表 4-10 KK 系列常见型号的主要参数

型号 TYPE	I_T (AV) A	U_{DRM}/U_{RRM} V	I_{TM}/U_{TM} (T_{jm}) A/V		T_q μs	I_{TSM} kA	I^2t kA^2s	T_{jm} $^{\circ}C$	T_C $^{\circ}C$
KK02BS12-20	200	1200~2000	600	2.60	20	2.4	29	125	55
KK02CS12-20	200	1200~2000	600	3.20	20	2.4	29	125	55
KK05DS12-14	500	1200~1400	1200	2.50	15	6.0	180	125	55
KK05DS12-20	500	1200~2000	1200	2.50	30	6.0	180	125	55
KK08ES12-14	800	1200~1400	1600	2.20	15	9.6	460	125	55
KK06ES12-20	600	1200~2000	1600	2.80	20	7.2	260	125	55
KK10FS12-20	1000	1200~2000	2000	2.60	25	12.0	720	125	55
KK12IS22-25	1200	2200~2500	2000	2.65	50	14.4	1040	125	55
KK23PS28-32	2300	2800~3200	3000	2.30	50	27.6	3800	125	55
KK35MS22-25	3500	2200~2500	3000	1.95	50	42.0	8820	125	55
KK32MS26-32	3200	2600~3200	3000	2.15	50	38.4	7380	125	55

续表

型号 TYPE	$I_T(AV)$	U_{DRM}/U_{RRM}	$I_{TM}/U_{TM}(T_{jm})$		T_q	I_{TSM}	\dot{I}^2t	T_{jm}	T_C
	A	V	A/V		μs	kA	kA ² s	℃	℃
KK43QS25-32	4300	2500~3200	3000	2.15	70	60.2	18120	125	55
KK53UY22-32	5300	2200~3200	3000	2.00	80	63.6	20200	125	55
KK22HS12-20	2200	1200~2000	2000	1.70	30	26.4	3500	125	55
KK20HS12-20	2000	1200~2000	2000	1.90	25	24.0	2900	125	55
KK20HS22-27	2000	2200~2700	2000	2.00	50	24.0	2900	125	55
KK25PS12-20	2500	1200~2000	3000	2.05	30	30.0	4500	125	55
KK30PS22-27	3000	2200~2700	3000	1.85	80	36.0	6500	125	55
KK25PS22-27	2500	2200~2700	3000	2.15	50	30.0	4500	125	55

4.6.4 温控晶闸管

1. 符号

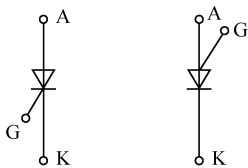
温控晶闸管（简称 TTS 或 TT）是一种对温度敏感的晶闸管，具有与普通晶闸管一样的开关特性。

1) 文字符号

温控晶闸管的文字符号是 VTS、TTS 或 TT。

2) 图形符号

图形符号如图 4-70 所示。G 从中间 P 层引出的称 P 型控制极；从 N 层引出的称 N 型控制极。



(a) P型控制极 (b) N型控制极

图 4-70 温控晶闸管图形符号

2. TTS 的结构

TTS 的结构和等效电路如图 4-71 所示。

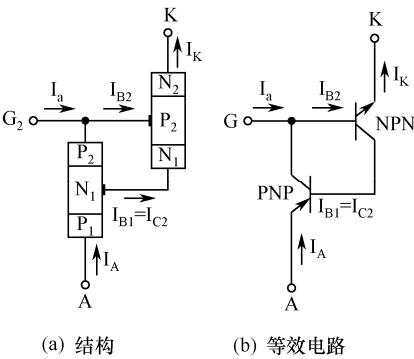


图 4-71 TTS 的结构和等效电路

P、N、P 组成 PNP 管，P 为发射区；N、P、N 组成 NPN 管，N 为发射区；由公用的 N₁、P₂ 层分别作为两管的控制区。

TTS 也是 PNPN 四层结构，可以用一个 PNP 晶体管和一个 NPN 晶体管的组合来模拟。

3. TTS 的工作原理

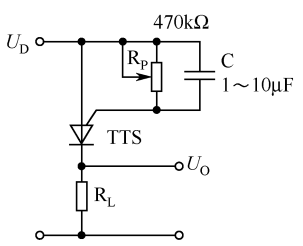
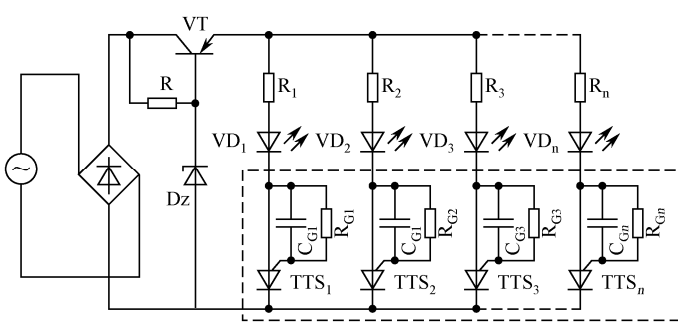
1) TTS 的正向开关电压 随温度的升高而下降	在一定正向阳极电压作用下仍处于阻断状态的 TTS，当环境温度达到开关温度时，其开关电压刚好下降到与所加阳极电压相等，TTS 进入导通状态，从而实现了温度开关作用。
2) 控制极上并联电阻	控制极上并联电阻，可以改变 TTS 的开关温度，而且电阻越小，开关温度越高。这个并联电阻称为控制极分路电阻（简称控制极电阻）。实际中使用适当的控制极分路电阻是获取需要开关温度的有效而又易行的方法。接入的电阻越小，分流作用越强；电流增益越小，开关温度越高。一般情况下，在较高温度下适合接 P 型控制极分路电阻，在较低温度下适合接 N 型控制极分路电阻。
3) 自动控温	在 TTS 的控制极可以并接电位器、光敏电阻、热电阻或热敏电阻、晶体管、MOS 管等，通过这些元器件阻抗的自动变化，可实现开关温度的自动控制。
4) 用电压控制开关温度	提高阳极电压，电流增益变大，开关温度降低；反之，开关温度升高。
5) 电压上升率 dU/dt	<p>TTS 的 dU/dt 特性与普通晶闸管相同，dU/dt 过大会造成 TTS 的误动作，应尽量避免。接入控制极分路电阻不仅可以提高 TTS 的开关温度，而且能改善 dU/dt 特性。如在分路电阻上再并联一个分路电容，TTS 的 dU/dt 特性会得到明显改善。</p> <p>分路电容和电阻的引入减小了 TTS 的小信号电流增益，导致开关温度的提高。为了兼顾 dU/dt 特性和开关温度，分路电容一般小于 0.01pF，分路电阻通常大于 100kΩ。</p>

4. TTS 基本参数

1) 断态重复峰值电压 U_{DRM}	断态重复峰值电压是指在规定的控制极回路条件下，在阳极与阴极间允许施加的最大正向峰值电压。
2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}	反向重复峰值电压是指在规定的控制极回路条件下，在阳极与阴极间允许反复施加的反向最大峰值电压，一般取反向不重复峰值电压 U_{RSM} 的 80%左右，除了偶然出现的瞬态电压（如操作过电压或雷击过电压等）以外，皆不得超过此电压值。
3) 平均通态电流 $I_{T(AV)}$	平均通态电流是指在规定的频率、温度、正向电压、正向电流波形条件下所允许通过的正向电流的平均值。
4) 浪涌通态电流 I_{TSM}	浪涌通态电流是指流过 TTS 器件的最大允许电流的峰值。这种电流不得反复施加。
5) 反向漏电流 I_{RRM}	反向漏电流是指在规定结温和控制回路条件下，阳极与阴极间加以一定的反向电压时流过阳极的电流。
6) 关断电流 I_{DRM}	关断电流是指在一定结温和控制回路条件下，阳极与阴极加上规定的正向电压，而器件处于阻断状态时流过阳极的电流。
7) 通态压降 U_{TM}	通态压降是指在导通状态下，在规定的电流流过阳极时，在阳极与阴极间的电压降。
8) 开关温度 S_{TW}	开关温度是指在规定的控制极回路条件和工作电压下，TTS 导通时对应的温度值。

9) TTS-200 系列温控晶闸管主要参数	型号	工作电压范围 U_D (V)	重复峰值关态电压 (V)	重复峰值反向电压 (V)	平均通态电流 (mA)	开关 (°C)
	TTS-201	1.25~50	50 (25°C)	5	120	10~120
	TTS-202					-10~80
	TTS-203					-40~60

5. TTS 应用

1) 基本应用电路 温控晶闸管的基本应用电路如图 4-72 所示。	<p>(1) 电路原理图</p>  <p>图 4-72 TTS 基本应用电路</p> <p>图中, R_p 是控制开关温度的电阻, 选择不同的 R_p 阻值可得到不同的开关温度; U_D 是工作电压; U_O 是输出电压; R_L 是负载电阻。</p>
	<p>(2) 工作原理: 当温度未达到开关温度时, 温控晶闸管截止, U_O 端输出低电平; 当温度达到或超过开关温度时, 温控晶闸管导通, U_O 端输出高电平。</p> <p>工作电压 U_D 的大小直接影响开关温度的高低, 为保证开关温度的稳定性, U_D 应来自稳压电源。电容 C 的主要作用是抗干扰。</p>
	<p>(3) 应用: TTS 在电热毯、电热水器、暖风机、电吹风、电烫斗、电饭煲、电冰箱、空调器、恒温箱、老化箱、电机、计算机、变压器、电源以及充电器等产品的过热保护、温度控制、超温报警等领域得到广泛应用。</p>
2) 在温度显示中的应用	<p>(1) 电路原理图 (见图 4-73)</p>  <p>图 4-73 温度柱式显示器电路原理图</p> <p>(2) 电路构成: 温控晶闸管温度柱式显示器电路如图 4-73 所示。图中, TTS 与发光二极管串接在桥式整流电路中; 晶体管 VT 和稳压管 Dz 组成稳压电路, 减小电压波动对温控晶闸管开关温度的影响; TTS 的控制极并接了电阻和电容; 控制极并联电阻 $R_{G1} \sim R_{Gn}$, 发光二极管 VD 与 TTS 串接在电路中。</p>

	<p>(3) 工作原理：由于电源电路为单相桥式整流电路，所以温控晶闸管不承受反向电压，在每个周期（360°）内导通两次。</p> <p>当实际温度达到某个温控晶闸管设定的开关温度时，它就由关断状态进入导通状态，点亮相应的发光二极管。由于 $R_{G1} > R_{G2} > R_{G3} \cdots > R_{Gn}$，而其他参数相同，所以当温度升高时，温控晶闸管 TTS_1、$TTS_2 \cdots TTS_n$ 依次导通，相应的发光二极管 VD_1、$VD_2 \cdots VD_n$ 依次发光。如将 VD_1、$VD_2 \cdots VD_n$ 由低向高依次安装，构成柱式显示器，这种温度显示方式可以代替棒状温度计。</p>
--	---

6. TTS 检测

1) 电极判别	温控晶闸管的内部结构与普通晶闸管相似，可以用判别普通晶闸管电极的方法来找出温控晶闸管的各电极。
2) 性能检测	用普通晶闸管的性能检测方法也可以大致检测温控晶闸管性能。

4.6.5 光控晶闸管

1. 符号

1) 文字符号

光控晶闸管的文字符号是 VS、LCT 或 LSCR。

2) 图形符号

电路图形符号如图 4-74 所示。



图 4-74 光控晶闸管的图形符号

2. 外形（见图 4-75）

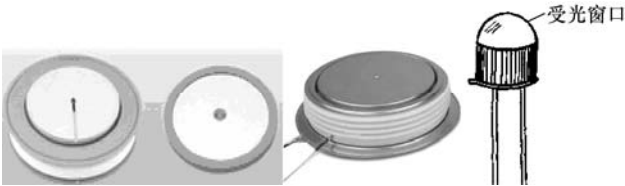


图 4-75 光控晶闸管

3. 结构与等效电路

光控晶闸管的控制信号来自光的照射，不再需要引出控制极，所以只有阳极 A 和阴极 K。但它的结构是与普通可控硅一样的四层 PNP 构成。从外形上看，光控晶闸管有受光窗口，插装的还有两条引脚和壳体，酷似光电二极管。光控晶闸管的内部结构和等效电路如图 4-76 所示。

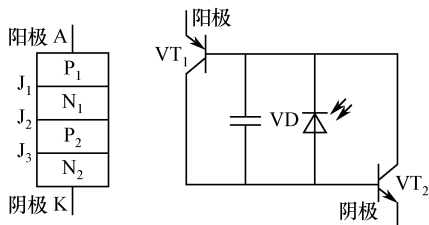


图 4-76 光控晶闸管的内部结构与等效电路

大功率光控晶闸管除有阳极和阴极外，还带有光导纤维引线（即光缆），光缆上装有为触发光源的发光二极管或半导体激光器。

4. 工作原理

<div>1) 工作原理图</div> <div>当在光控晶闸管的阳极与阴极间加上正向电压时，工作原理电路图如图 4-77 所示。</div>	<div></div> <div>图 4-77 工作原理电路图</div>
<div>2) 各电流间关系</div>	<div>图 4-77 中各电流间关系用下式表示：</div> <div>$I_a=I_L/(1-(\alpha_1+\alpha_2))$</div> <div>式中，$I_L$ 为光电二极管的光电流；I_a 为光控晶闸管阳极电流（即光控晶闸管的输出电流）；α_1、α_2 分别为 VT_1、VT_2 的电流放大系数。</div> <div>由上式可知，阳极电流 I_a 与二极管的光电流 I_L 成正比，即当光电二极管的光电流增大时，光控晶闸管的输出电流也相应增大；同时 I_L 的增大，使 VT_1、VT_2 的电流放大系数 α_1、α_2 也增大。当 α_1 与 α_2 之和接近 1 时，光控晶闸管的 I_a 达到最大，即完全导通。</div>
<div>3) 导通光照度</div>	<div>导通光照度是指能使光控晶闸管导通的最小光照度。</div>
<div>4) 导通</div>	<div>光控晶闸管的阳极和阴极间加正向电压，门极区有一定波长、足够强度的光照射，光控晶闸管就由断开状态转为导通状态。导通后，即使撤离光源也能维持导通。</div>
<div>5) 关断</div>	<div>加在阳极和阴极之间的电压为零或为反向电压时，光控晶闸管才能关断，由导通状态转为关闭状态。</div>
<div>6) 光触发</div>	<div>当光控晶闸管承受正向电压时，有足够强和规定波长的入射光照射下就会导通。在一定光强范围内，光强越强，导通越快。导通后，不再受光强的影响，一直维持导通状态。</div>

5. 特点

1) 功率较小	光控晶闸管通常能在微弱的光照下触发导通，即光控晶闸管在很小的控制电流下就能可靠导通，容易受高温和耐压能力的影响，所以光控晶闸管的功率一般较小。
2) 触发灵敏度高	光控晶闸管的门极区集成了一个光电二极管，触发信号源与主回路绝缘，触发灵敏度高。
3) 频谱影响	光控晶闸管必须用光进行触发，触发光源的波长通常为 0.8~0.9μm 的红外线及波长在 1.0μm 左右的激光。
4) 抗干扰能力强	主电路与控制电路通过光耦合，彼此相互隔离，可以抑制噪声干扰，且容易满足对高压绝缘的要求。
5) 体积小、重量轻	光控晶闸管不需要触发脉冲变压器等器件，减轻了重量，缩小了体积，提高了可靠性。

6. 主要特性参数

1) 伏安特性	光控晶闸管的伏安特性曲线形状与普通晶闸管的相同。如果使加有正向电压的光控晶闸管接受不同强度光的照射，光控晶闸管的转折电压将随着光照强度的增大而减小。
2) 触发参数	光控晶闸管的触发参数主要有触发光功率和光谱响应范围。触发光功率是指光控晶闸管由关闭状态转为导通状态所需要的输入功率，一般为几毫瓦至十几毫瓦。光谱响应范围是指光控晶闸管只对一定波长范围的光敏感，在此范围外，不论光强多大都不能使它导通，光谱范围通常为 0.55~1.0μm。
3) 触发光源	触发光源有发光二极管、激光二极管、激光器等；对于小功率器件，也可以选用合适的白炽灯或太阳光。
4) 触发方式	LCT 有直接触发和间接触发两种方式。直接触发是指用合适光源直接照射在 LCT 的受光面，光源和 LCT 可以组装在一起形成一个光耦合开关。间接触发是指利用光缆将光引进 LCT 或将光信号转换成电信号使其触发，多用于大功率的光控晶闸管。
5) 超大功率光控晶闸管 (LTT) 参数	超大功率光控晶闸管主要用于大型直流输电工程所需要的相控器件。其型号及主要参数见表 4-11。

7. 应用

由于光控晶闸管具有独特的光控特性，小功率光控晶闸管被广泛用于光继电器、隔离输入开关、光计数器、光报警器、光触发脉冲发生器、液位、料位、物位控制等领域；大功率光控晶闸管主要用于大电流脉冲装置和高压直流输电系统。

1) 选择 LCT	(1) 选触发光源：光控晶闸管接受不同波长的光照时，响应速度不同，对波长范围为 80~95μm 的红外线最敏感。砷化镓发光二极管所发光的波长为 94μm 时功率最大，所以它是控制光控晶闸管较为理想的光源。有时也可用激光、白炽灯光或阳光作光控晶闸管的控制光源。
	(2) 选光照度：照度与光控晶闸管参数“导通光强度”相对应。导通光强度是指光控晶闸管导通时需要的最低光照度，一般在 1000 lx 以下。
	(3) 用作普通晶闸管：光控晶闸管有三极型和两极型两大类。三极型光控晶闸管可作为

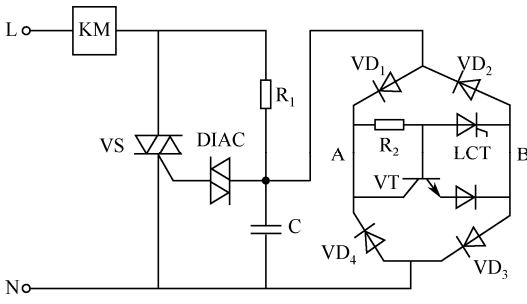
1) 选择 LCT	普通晶闸管，但主要还是作为光控晶闸管。作普通晶闸管使用时，可用控制极进行触发，但必须避免光的照射；作光控晶闸管使用时，由于采用光信号触发，控制极与阴极间必须并联一个 $2\sim 100\text{k}\Omega$ 的电阻，绝对不可悬空；还可在电阻上并联一个 $0.001\sim 0.01\mu\text{F}$ 的电容器，以防止电磁杂波信号的干扰，避免光控晶闸管的误触发导通。
2) 光控交流接触器	<p>(1) 电路结构：光控交流接触器的电气原理图如图 4-78 所示。图中，接触器 KM 和双向晶闸管 VS 串联后接入火线 L 和中性线 N 之间；VS 由双向二极管 DIAC 触发；VD₁~VD₄ 构成整流桥为 LCT 供电。</p>  <p style="text-align: center;">图 4-78 光控交流接触器的电气原理图</p> <p>(2) 工作原理。</p> <p>建立 LCT 工作电压：电路工作时，如无光照，交流电源通过交流接触器 KM、电阻器 R₁ 和桥式整流器整流，在 A、B 两端获得了十几伏直流电压，其极性是 A 端为正，B 端为负。</p> <p>无光照时：光控晶闸管 LCT 处于关断状态，此时三极管 VT 通过 R₂ 获得偏流而导通，电容器 C 两端的电压被钳制在低于双向触发二极管 DIAC 的转折电压范围之内，因而 DIAC 截止，VS 关断，KM 线圈中无电流流过，接触器处于断开状态。</p> <p>有光照时：当有光照射到光控晶闸管的光敏面上时，LCT 导通，三极管 VT 截止，电容器 C 迅速建立起高于双向触发二极管 DIAC 的转折电压的电位，使晶闸管 VS 导通，KM 线圈中有电流通过，接触器吸合。</p>

表 4-11 常见超大功率光控晶闸管型号及主要参数

型号	U_{BO} (V)	U_{RRM} (V)	I_{TRMS} (A)	I^2t (A ² s)	I_{TSM} (kA)	$V_{\text{T}}/I_{\text{T}}$ (V/kA)
KL06	6500	7000	1200	684	11.7	2.65/1.0
KL18	7500	7500~8000	3800	8000	40.0	3.0/4.0
KL26	7500	7500~8000	5600	15700	56.0	2.95/6.0
KL38	5200	5220	8130	50000	100.0	1.8/6.0

4.6.6 光耦晶闸管

1. 组成与外形

1) 组成

光耦晶闸管（又称光耦可控硅、晶闸管输出光耦合器）由输入和输出两部分组成，输入部分是发光二极管，输出部分是硅光敏双向晶闸管，在光照作用下可双向导通。器件一般为六引脚双列直插式封装。

2) 外形（见图 4-79）



图 4-79 光耦晶闸管

2. 内部电路结构及原理

在实际电路中，光耦晶闸管内的发光二极管接进输入电路后，在 5~15mA 正向电流作用下可以发出足够强的光线（多为紫外线）触发输出部分的晶闸管。其内部电路结构如图 4-80 所示。

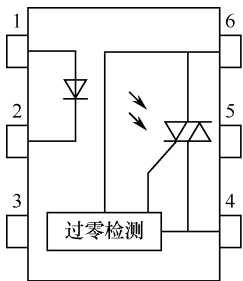


图 4-80 光耦晶闸管内部电路结构

3. 特点

光耦晶闸管的主要特点是体积小、寿命长、无触点、价格低廉、触发电路简单可靠、抗干扰能力强、输入与输出完全隔离、能承受高压而保持良好的绝缘性能、能传输模拟和数字信号。

4. 光耦晶闸管的主要参数

隔离电压一般在 5.0~7.5kV。峰值输出电压 (U_{dm}) 可达 400V。典型输入电压为 1.15V，最大输入电压为 1.5V。最大输出电压可达交流 280V。最小触发电流的典型值为 15mA。输入电流一般为 10mA，最大输入电流为 50mA。最大功率耗散为 330mW。反向电压一般为 3V，最大反向二极管电压为 6V。最大开启时间约 20μs。正向电流一般为 5~50mA。工作温度范围为 -40~+85℃。

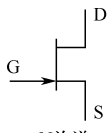
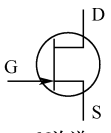
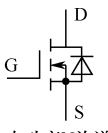
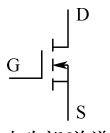
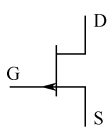
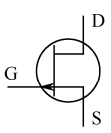
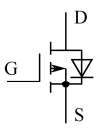
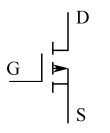
















































第 5 章 场效应管

场效应管（又称场效应晶体管、单极晶体管，简称 FET）是利用输入电压产生的电场效应来控制输出电流的一种电压控制型器件，是只依靠一种载流子导电的晶体管。

5.1 场效应管的结构与原理

5.1.1 场效应管的基本知识

1. 场效应管的符号

1) 文字符号	FET 的文字符号是 VT，也有用 V、T、TR、Q 等字母表示的。																																			
	(1) 常用图形符号：常用 FET 的图形符号如图 5-1 所示。图中，箭头的方向是由 P 型区指向 N 型区。																																			
	<div><div><div> N 沟道</div><div> P 沟道</div><div> 大功率 N 沟道</div><div> 小功率 N 沟道</div><div> P 沟道</div><div> P 沟道</div><div> 大功率 P 沟道</div><div> 小功率 P 沟道</div></div><div>(a) 结型场效应管 (b) 绝缘栅增强型场效应管</div></div>																																			
	图 5-1 FET 的常用图形符号																																			
	(2) 其他图形符号：常见 FET 的图形符号还有其他几种，如图 5-2 所示。																																			
2) FET 的图形符号	<table><tr><td rowspan="2">JFET</td><td>P 沟道</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td>N 沟道</td><td colspan="4"></td></tr><tr><td rowspan="4">MOSFET</td><td rowspan="2">增强型</td><td>P 沟道</td><td></td><td></td><td></td><td>衬底</td></tr><tr><td>N 沟道</td><td></td><td></td><td></td><td>衬底</td></tr><tr><td rowspan="2">耗尽型</td><td>P 沟道</td><td>衬底</td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>N 沟道</td><td>衬底</td><td></td><td></td><td></td></tr></table> <div>衬底外部连接 衬底内部连接</div>		JFET	P 沟道					N 沟道					MOSFET	增强型	P 沟道				 衬底	N 沟道				 衬底	耗尽型	P 沟道	 衬底				N 沟道	 衬底			
JFET	P 沟道																																			
	N 沟道																																			
MOSFET	增强型	P 沟道				 衬底																														
		N 沟道				 衬底																														
	耗尽型	P 沟道	 衬底																																	
		N 沟道	 衬底																																	
图 5-2 其他 FET 图形符号																																				

2. 常见场效应管（见图 5-37）

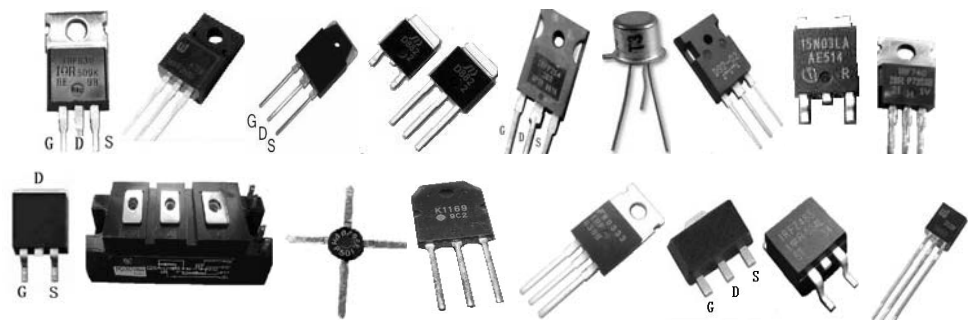


图 5-3 常见场效应管

3. 场效应管的分类

1) 按内部结构	<p>(1) 场效应管 (FET) 分为结型、绝缘栅型两大类。</p> <p>(2) FET 内部有两个 PN 结，引出的三根引线分别为栅极 (G)、漏极 (D) 和源极 (S) 三个电极 (双栅场效应管有四个电极)。</p> <p>(3) 绝缘栅型场效应管的栅极与其他两个电极完全绝缘。在绝缘栅型场效应管中，应用最为广泛的是 MOS 场效应管 (简称 MOS 管，即金属-氧化物-半导体场效应管，缩写是 MOSFET)，所以通常用 MOSFET 来表示绝缘栅型场效应管。MOS 管主要分为一般 MOS 管和 VMOS 管两种，每种又有 N 型沟道和 P 型沟道两种结构；每种结构都有增强型和耗尽型之分。此外还有 TMOS、DMOS、πMOS 场效应管、MOS 功率模块等。</p>
2) 按沟道材料	结型和绝缘栅型场效应管各分为 N 沟道和 P 沟道两种。
3) 按导电方式	结型场效应管皆为耗尽型；绝缘栅型场效应管既有耗尽型的，也有增强型的。
4) 分类示意图	<div><div>FET 场效应管</div><div><div>JFET 结型</div><div>MOSFET 绝缘栅型</div></div><div><div>耗尽型</div><div>增强型</div><div>耗尽型</div></div><div><div>N沟道</div><div>P沟道</div><div>N沟道</div><div>P沟道</div><div>N沟道</div><div>P沟道</div></div></div>

4. 双向导电特性

1) 结型场效应管	结型场效应管 (即 JFET) 具有双向导电特性，即漏极和源极可以互换。互换的条件是低电压、小电流、小功率。
2) 绝缘栅型场效应管	<p>绝缘栅型场效应管 (即 MOSFET) 其实也具有双向导电特性，但大功率 MOSFET 一般内置体二极管，如图 5-1 (b) 所示，所以不再具备这个特性。</p> <p>有时候体二极管是外置的，称为续流二极管。内置的体二极管有时也称为续流二极管，在功能上两者的作用是一样的。</p>

5. 场效应管的特性

(1) 场效应管源极 S、栅极 G、漏极 D 三个电极的作用分别与三极管的发射极 E、基极 B、集电极 C 的作用相似。
--

(2) 场效应管的图形符号与三极管图形符号的对应关系如图 5-4 所示。

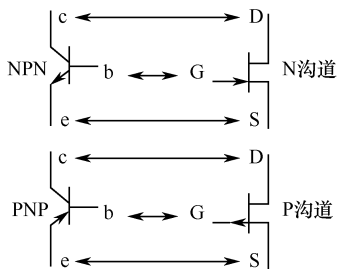


图 5-4 场效应管与三极管图形符号的对应关系

- (3) 场效应管是电压控制元件，漏极电流 I_D 受电压 U_{GS} 控制。
- (4) 场效应管只利用多数载流子导电，故称为单极晶体管。
- (5) 场效应管工作时的栅极电流极小，几乎为零；其输入电阻非常高。
- (6) 有些场效应管的源极和漏极可以互换使用，栅压也可正、可负。
- (7) 预夹断前， I_D 与 U_{DS} 呈近似线性关系；预夹断后， I_D 趋于饱和，基本不再随 U_{DS} 的改变而变化。
- (8) P 沟道场效应管的特性曲线，除了电流、电压的方向与 N 沟道场效应管相反以外，两者的其他特性完全类似。但 P 沟道 FET 工作时，其电源极性与 N 沟道 JFET 的电源极性相反。
- (9) 结型场效应管的放大作用一般指的是电压放大作用。
- (10) 场效应管具有很强的抗辐射能力。
- (11) 可用输入电压控制其输出电流的变化。
- (12) 场效应管的噪声较低。
- (13) 场效应管能在很小电流和很低电压的条件下工作，而且它的制造工艺可以很方便地把很多场效应管集成在一块硅片上。

6. 特点

场效应管具有输入电阻高、动态范围大、噪声低、温度系数小、安全工作范围宽等优点。

7. 应用

场效应管广泛应用于各种家用电器、通信、仪器仪表、计算机、集成电路及其他电子设备中。

5.1.2 场效应管的基本原理

1. 结型场效应管的结构和工作原理

1) 结型场效应管的结构 JFET 的结构示意图如图 5-5 所示。	图 5-5 (a) 是在一块 N 型硅半导体基片两侧扩散两层高掺杂的 P 型区，从两个 P 型区引出两个电极连在一起，称为栅极 (G)。在 N 型硅半导体基片另外两端引出两个电极，分别称为源极 (S) 和漏极 (D)。P 区和 N 区之间形成耗尽区 (层)，耗尽区宽度主要在 N 区一侧，由于耗尽区不导电，因此在漏极和源极间电压 (U_{DS}) 的作用下，N 区中的多数载流子 (即电子) 只能沿两个耗尽区之间的狭长路径 (N 型导电沟道) 自源极向漏极运
------------------------------------	---

1) 结型场效应管的结构
JFET 的结构示意图如图 5-5 所示。

动, 形成漏极电流 (I_D)。这种结构称为 N 型沟道结型场效应管。用类似的方法可以制成 P 型沟道结型场效应管, 如图 5-5 (b) 所示。

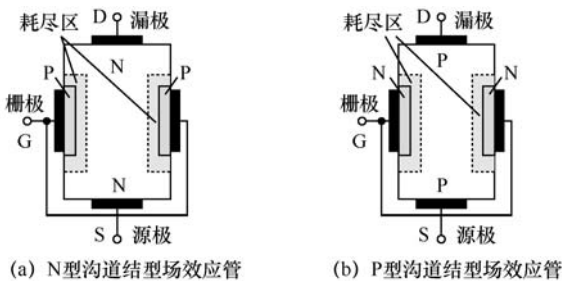


图 5-5 结型场效应管的结构示意图

2) 结型场效应管的工作原理

以 N 型沟道 JFET 为例, 分析 JFET 的工作原理。N 沟道 JFET 的工作原理示意图如图 5-6 所示。

(1) 在工作时, 如在 G-S 极间接负电压 (即 $U_{GS} < 0$), 使栅极沟道间的 PN 结反偏, 此时栅极电流 $I_G = 0$ 。

(2) 在工作时, 如在漏极与源极之间加正电压 (即 $U_{DS} > 0$), 使 N 沟道中的多数载流子 (电子) 在电场作用下由源极向漏极运动, 形成漏极电流 I_D , I_D 的大小受 U_{GS} 控制。

(3) U_{GS} 对 I_D 的控制作用。在 $U_{DS} = 0$ 时, 当 U_{GS} 由零向负值增大时, 在反偏电压 U_{GS} 的作用下, 两个 PN 结的耗尽区将加宽, 使导电沟道变窄, 沟道电阻增大, 如图 5-6 (a)、(b) 所示。当 $|U_{GS}|$ 继续增大到某一数值 $|U_P|$ 时, 两侧耗尽区将合拢, 沟道全部被夹断, 如图 5-6 (c) 所示。此时漏-源极间的电阻将趋于无穷大, 此时的栅-源电压称为夹断电压 U_P 。

由此可知, 改变 U_{GS} 的大小, 可以有效地控制沟道电阻的大小。

当在漏-源极间加上固定的正向电压 U_{DS} 时, 由漏极流向源极的电流 I_D 将受 U_{GS} 的控制, $|U_{GS}|$ 增大时, 沟道电阻增大, I_D 减小。

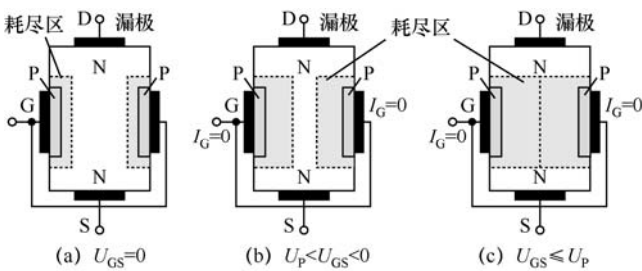


图 5-6 $U_{DS} = 0$ 时, 栅源电压 U_{GS} 改变对导电沟道的影响

(4) U_{DS} 对 I_D 的影响。在 $U_{GS} = 0$ 时, 当 $U_{DS} = 0$ 时, $I_D = 0$, 沟道如图 5-7 (a) 所示。

随着 U_{DS} 逐渐增加, 沟道电场强度加大, 漏极电流 I_D 增加。同时, 在源极经沟道到漏极组成的 N 型半导体区域中, 产生了一个沿沟道的电位梯度。源极为零电位, 漏极电位为 $+U_{DS}$, 沟道区的电位差则从靠近源极端的零电位逐渐升高到靠近漏极端的 U_{DS} 。在从源极端到漏极端的不同位置上, 栅极与沟道之间的电位差是不相等的, 离源极越远, 电位差越大, 加在该处 PN 结的反向电压也越大, 耗尽区也越向 N 型半导体中心扩展, 使

2) 结型
场效应管的
工作原理

以 N 型
沟道 JFET 为
例，分析
JFET 的工作
原理。N 沟道
JFET 的工作
原理示意图如
图 5-6 所示。

靠近漏极处的导电沟道比靠近源极要窄，导电沟道呈楔形，如图 5-7 (b) 所示。

随着 U_{DS} 的继续增加，阻碍漏极电流 I_D 的因素也在增加。在 U_{DS} 较小时，导电沟道靠近漏端区域仍较宽，对 I_D 的阻碍较小， I_D 随 U_{DS} 升高几乎成正比地增大。

当 U_{DS} 继续增加时，使栅极和漏极间的电位差加大，靠近漏极端时的电位差最大，耗尽区也最宽。当两耗尽区在 A 点相遇时，称为预夹断，如图 5-7 (c) 所示。此时，A 点耗尽区两边的电位差用夹断电压 U_P 来描述。达到预夹断时， I_D 达到饱和，用 I_{DSS} 表示，即饱和漏极电流。

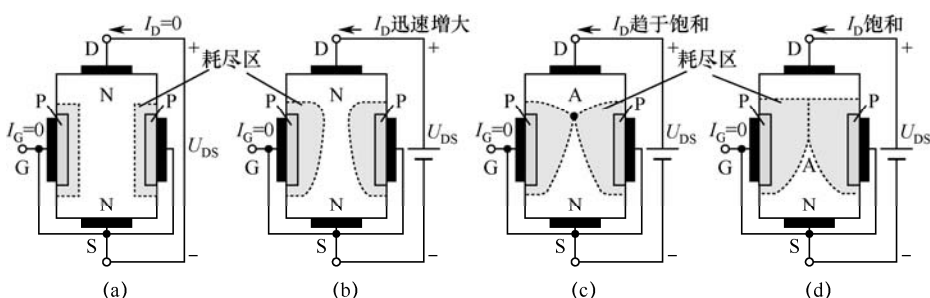


图 5-7 JFET 导电沟道随 U_{DS} 的变化示意图

图中，(a) $U_{GS}=0$, $U_{DS}=0$; (b) $U_{GS}=0$, $U_{DS} < |U_P|$ (即 U_P 的绝对值); (c) $U_{GS}=0$, $U_{DS} = |U_P|$; (d) $U_{GS}=0$, $U_{DS} > |U_P|$ 。

当沟道在 A 点预夹断后，随着 U_{DS} 继续增加，夹断长度也随之增加，夹断点 A 向源极方向移动。由于夹断处场强也增大，自由电子仍能越过夹断区 (即耗尽区) 形成漏极电流 I_D 。

在从源极到夹断处的沟道上，沟道内电场基本上不随 U_{DS} 变化而变化。漏极电流 I_D 基本不随 U_{DS} 增加而上升，漏极电流趋于饱和。

2. 绝缘栅型场效应管的结构及工作原理

绝缘栅型场效应管 (缩写 MOSFET, 简称 MOS 管) 有 N 沟道和 P 沟道两类，其中每一类又分为增强型和耗尽型两种。增强型就是在 $U_{GS}=0$ 时，没有导电沟道存在，漏极电流 I_D 为零；耗尽型就是在 $U_{GS}=0$ 时，存在导电沟道，漏极电流 I_D 不为零。下面是 N 沟道增强型场效应管 (NMOS 管) 的结构和工作原理。

1) NMOS 管
的结构

NMOS 管的结构如图 5-8 (a) 所示。在一块 P 型硅片 (作为衬底) 上通过扩散工艺形成两个高掺杂的 N 区，每个 N 区引出一个电极作为源极 S 和漏极 D，在两个 N 区之间覆盖一层二氧化硅 (SiO_2) 作为绝缘层，在其上面再制作一层金属薄膜作为栅极 G。由于栅极和其他两个电极及衬底之间是绝缘的，故称绝缘栅型。

图 5-8 (b)、(c) 所示的是 N 沟道 MOSFET 的图形符号。增强型 MOS 管的 D、B、S 之间是断开的，表示栅-源电压为零时没有导电沟道。符号中箭头的方向是由 P 区 (衬底) 指向 N 区 (沟道)，是 PN 结的导通方向。对于 N 型沟道的 MOSFET，箭头向里；

1) NMOS 管
的结构

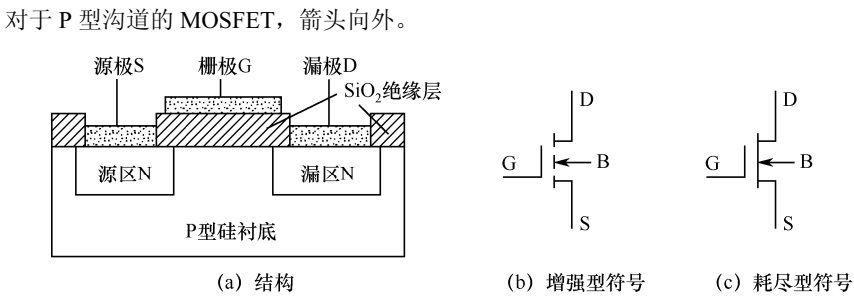


图 5-8 N 沟道 MOS 管的结构和图形符号

2) NMOS 管
的工作原理
N 沟道 MOS 管
的工作原理示意
图如图 5-9 所示。

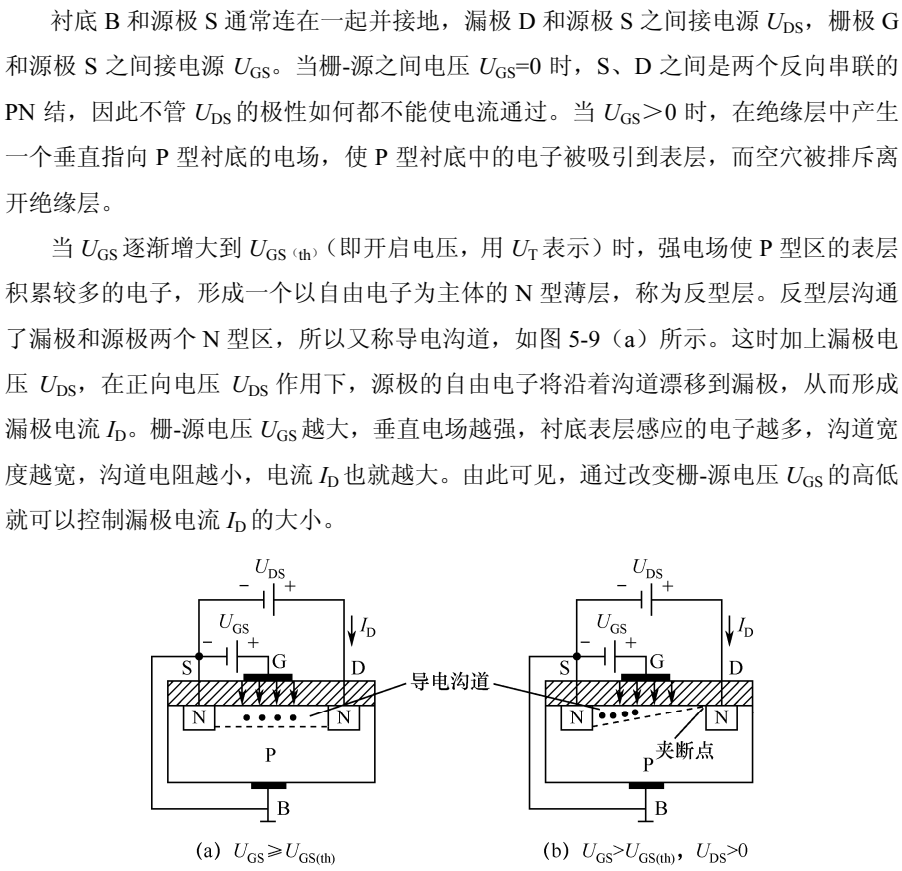


图 5-9 增强型 NMOS 管工作原理示意图

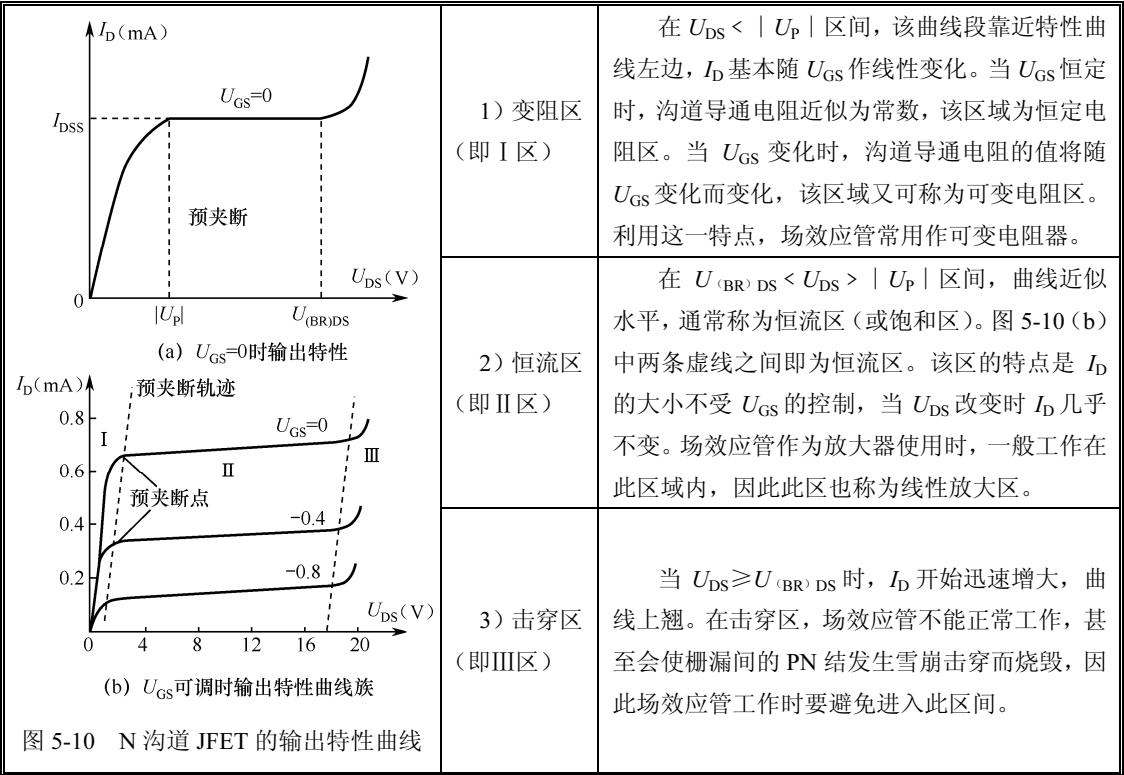
导电沟道形成后，在正向电压 U_{DS} 的作用下，漏极电流 I_D 沿沟道产生的压降使沟道各点与栅极间的电压不再相等，该电压削弱了栅极中正电荷电场的作用，使沟道从源极到漏极逐渐变窄，当 U_{DS} 增加到使 $U_{GD}=U_{GS}$ 、 $U_{DS}=U_{GS(th)}$ 时，沟道在漏极附近出现预夹断。若再继续增大 U_{DS} ，夹断区只是稍有加长，而沟道电流基本保持预夹断时的数值。

由此可知，这种 MOS 管是一个受栅-源电压 U_{GS} 控制的器件，当 $U_{GS}<U_{GS(th)}$ 时，漏-源之间不可能导通；只有当 $U_{GS} \geq U_{GS(th)}$ 时，才产生 N 型导电沟道，因此称之为 N 沟道增强型 MOS 管，简称 NMOS 管。

5.1.3 结型场效应管的特性曲线

1. 输出特性（即漏极特性）

当栅-源极电压 $U_{GS}=0$ 时，结型场效应管的输出特性曲线如图 5-10（a）所示。输出特性曲线分为变阻区 I、恒流区 II 和击穿区 III 三个区，如图 5-10（b）所示。



2. 输出特性曲线族

当 FET 栅极与源极之间的电压 U_{GS} 为可调负电源时，调节 U_{GS} 的大小，使其值越负，耗尽区越宽，沟道电阻越大，相应的 I_D 就越小。这样调节栅源电压 U_{GS} ，可得到一族曲线，如图 5-10（b）所示。

每个场效应管的夹断电压 U_P 为一定值，但预夹断点随 U_{GS} 改变而变化，它在输出特性上的轨迹如图 5-10（b）中左边虚线所示。

3. 转移特性

转移特性是在漏-源极电压 U_{DS} 恒定时，漏极电流 I_D 同栅极电压 U_{GS} 的关系。结型场效应管的转移特性曲线如图 5-11 所示。

在转移特性曲线上，只要给出 U_{DS} ，便可找出对应的 I_D 。

此时源极与漏极间的电阻趋于无穷大，管子截止。电压 U_{GS} 越过 $|U_P|$ 后继续增加时，就会出现反向击穿而损坏管子。

在 $U_{DS}=|U_P|$ 的情况下，使 U_{GS} 从零开始增加到 U_P 的过程中，测出相应的 I_D 值，便可绘

出转移特性曲线，如图 5-11（a）所示。

图中， U_P 为夹断电压。在 $U_{GS}=0$ 时对应的 I_D 值称为漏极饱和电流 I_{DSS} 。随着 U_{GS} 变负、绝对值继续增大时，电流 I_D 将下降，一直到 $U_{GS}=U_P$ ， I_D 才等于零。

改变 U_{DS} 的大小，可以得到一族转移特性曲线，如图 5-11（b）所示。图中，当 U_{DS} 大于一定的数值后（在图 5-11b 中为 5V），不同大小 U_{DS} 的转移特性是很接近的，这是因为在饱和区 I_D 几乎不随 U_{DS} 的变化而变化。在放大电路中，FET 一般工作在饱和区，当 U_{DS} 的大小确定后就有了相应的转移特性曲线。

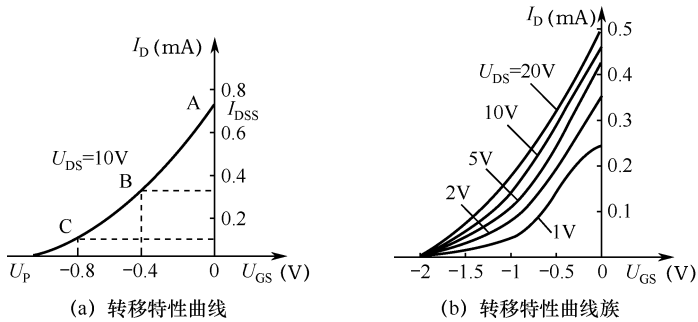


图 5-11 N 沟道结型场效应管的转移特性

5.1.4 NMOS 管的特性曲线

1. 转移特性

NMOS 管的转移特性曲线反映了在一定漏-源电压 U_{DS} 下栅-源电压 U_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制能力。增强型绝缘栅场效应管的转移特性曲线如图 5-12（a）所示。从图可知，NMOS 管在正栅-源电压下才能工作，且只有当 $U_{GS} \geq U_{GS(th)} > 0$ 时才有漏极电流（ $U_{GS(th)}$ 为栅-源极门槛电压或开启电压）。

2. 特性曲线（见图 5-12）

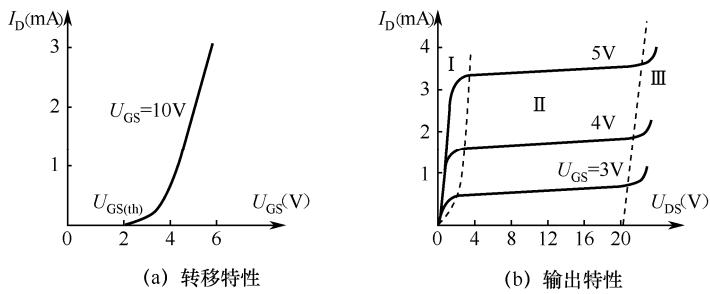


图 5-12 N 沟道增强型 MOSFET 特性曲线

3. 输出特性

输出特性（又称漏极特性）表示了某一固定的 U_{GS} 下，漏极电流 I_D 与漏-源电压 U_{DS} 之间的关系曲线，如图 5-12（b）所示。图中，曲线分成三个区：I 区为可变电阻区、II 区为恒流区、III 区为击穿区。

不难看出，N 沟道增强型 MOSFET 的输出特性曲线，与 JFET 的输出特性曲线是类似的。

1) I 区（即可变电阻区）

在该区， $U_{GS} > U_{GS(th)}$ ，导电沟道畅通。由于 U_{DS} 较小，漏极电流 I_D 与 U_{DS} 近似呈线性关系，D、S 之间相当于一只线性电阻 R_{DS} 。当 U_{GS} 取值不同时，对应的 R_{DS} 值也不同，即沟道电阻的大小随栅源电压 U_{GS} 而变化，故称之为可变电阻区。工作在此区域的场效应管可以当作一个受 U_{GS} 控制的可变电阻。

2) II 区（即恒流区）

此时， $U_{GS} > U_{GS(th)}$ ，且 U_{DS} 较大，此时漏极电流 I_D 只决定于 U_{GS} ，而与 U_{DS} 无关（不论 U_{DS} 增大或减小， I_D 基本不变），所以特性曲线是一段近似水平的曲线。

3) III 区（即击穿区）

在该区， U_{DS} 增加到一定数值后，由于加在沟道中耗尽区的电压太高，电场太强，致使栅-漏间的 PN 结发生雪崩击穿， I_D 迅速上升。进入雪崩击穿区后，管子不能正常工作，甚至很快烧毁。所以，FET 工作时不允许进入这个区域。

4) 在夹断区

夹断区类似于三极管输出特性的截止区，这时 $U_{GS} < U_{GS(th)}$ ，管子没有沟道，所以 $I_D = 0$ ，管子处于截止状态（图中未画出）。因此，也可以认为输出特性有四个区。

5.1.5 场效应管的主要参数

场效应管的参数很多，包括直流参数、交流参数和极限参数等，但一般使用时主要关注的是以下几类参数。

1. 直流参数

1) 开启电压 ($U_{GS(th)}$ 或 U_T)	开启电压（又称门槛电压）是使增强型绝缘栅场效应管的漏-源极刚导通时的栅极电压。
2) 夹断电压 ($U_{GS(off)}$ 或 U_P)	夹断电压是使结型或耗尽型绝缘栅场效应管漏-源极刚截止时的栅极电压。
3) 饱和漏-源 电流 (I_{DSS})	饱和漏-源电流（又称零栅压漏电流）是指在结型或耗尽型绝缘栅场效应管中栅极电压 $U_{GS} = 0$ 时的漏-源电流。对耗尽型场效应管是导通电流；对增强型场效应管是断态电流。实际上 I_{DSS} 是场效应管所能输出的最大电流。
4) 直流输入电 阻 (R_{GS})	直流输入电阻是指在漏极与源极之间短路的条件下，栅极和源极之间加一定电压时的栅-源极间的直流电阻。 JFET 的直流输入电阻值可达 $10^6 \sim 10^9 \Omega$ ；而 MOSFET 是利用半导体表面的电场效应进行工作的，也称为表面场效应器件。由于它的栅极处于不导电（绝缘）状态，所以输入电阻可大大提高，最高可达 $10^{15} \Omega$ 。

2. 交流参数

1) 低频跨导 (g_m)	低频跨导（也称互导）是在 U_{DS} 等于常数时，漏极电流 I_D 变化量与引起这个变化的栅-源电压 U_{GS} 变化量的比值。 g_m 是衡量场效应管的栅-源电压 U_{GS} 对漏极电流 I_D 的控制能力的重要参数，它相当于转移特性曲线上工作点的斜率，单位是 ms 或 μs 。
----------------------	---

2) 极间电容	<p>极间电容是指场效应管各电极之间主要由分布电容形成的杂散电容，它们分别为栅极与源极间电容 C_{gs}、栅极与漏极间电容 C_{gd}、源极与漏极间电容 C_{sd}。</p> <p>此外还有栅极与衬底间电容 C_{gb}、源极与衬底间电容 C_{sb}、漏极与衬底间电容 C_{db}。尽管这些电容的容量很小，通常栅-源极电容(输入电容)和栅-漏极电容的电容量为 $1\sim 3\text{pF}$；漏-源极电容的电容量为 $0.1\sim 1\text{pF}$，但它们对电路稳定性的影响是不容忽视的，处理不当会引起高频自激振荡。更不利的是使栅控器件的驱动不仅需要控制电压，还需要控制功率；当工作频率较高时，结电容的存在会消耗可观的驱动功率，频率越高，消耗的功率也越大。</p>
3) 输出电阻 (R_d)	<p>输出电阻是输出特性曲线上某一点切线斜率的倒数。在饱和区（即线性放大区），I_D 随 U_{DS} 改变很小，因此 R_d 的数值很大，一般在几十千欧到几百千欧之间。</p>

3. 极限参数

1) 最大漏-源电流 (I_{DSM})	<p>最大漏-源电流是指场效应管正常工作时，漏极和源极间所允许通过的最大电流。场效应管的工作电流不允许超过 I_{DSM}。</p>
2) 漏-源击穿电压 (BU_{DS})	<p>漏-源击穿电压是指栅源电压 U_{GS} 一定时，场效应管正常工作所能承受的最大漏-源电压。加在场效应管上的工作电压必须小于 BU_{DS}。</p>
3) 最大漏极耗散功耗 (P_{DM})	<p>场效应管的最大漏极耗散功耗由 $P_{DM}=U_{(BR)DS}I_{DM}$ 决定。</p>
4) 最大耗散功率 (P_{DSM})	<p>最大耗散功率是指场效应管性能不变坏时所允许的最大漏-源极的耗散功率。场效应管的功率耗散能使管子的温度升高。为了把管子的温升限制在许可范围内，就要限制它的耗散功率不超过 P_{DSM}。使用时，场效应管实际功耗应小于 P_{DSM}，并留有一定余量。</p>

4. 其他参数符号含义

I_{DM} ——漏极脉冲电流	I_{DQ} ——静态漏极电流（射频功率管）
I_{GF} ——正向栅极电流	I_{GDO} ——源极开路时，截止栅极电流
I_{GR} ——反向栅极电流	I_{GSO} ——漏极开路时，截止栅极电流
U_{GSR} ——反向栅-源电压（直流）	I_{GSS} ——漏极短路时截止栅极电流（即栅极漏电流）
G_p ——功率增益	η ——漏极效率（射频功率管）
R_{DS} ——漏-源极电阻	G_{PS} ——共源极中和和高频功率增益
I_{GP} ——栅极峰值电流	G_{PD} ——共漏极中和和高频功率增益
R_D ——栅-漏极电阻	U_{DSX} ——在规定的偏压下，漏-源极间耐压
U_{GSF} ——正向栅-源电压（直流）	U_{ss} ——源极（直流）电源电压（外电路参数）
t_{tr} ——反向恢复时间	$U_{(BR)GSS}$ ——漏-源极短路时栅-源极击穿电压
R_S ——栅-源极电阻	U_{GDS} ——漏-源极间短路时栅-漏极间的耐压
$U_{(BR)DSS}$ ——漏-源极击穿电压	U_{GSO} ——漏-源极间开路时栅-漏极间的耐压
$U_{DS(on)}$ ——漏-源极通态电压	G_{PG} ——共栅极中和和高频功率增益
$R_{DS(off)}$ ——漏-源极断态电阻	

5.2 场效应管的基本放大原理

同三极管的共发射极、共集电极和共基极放大电路类似，场效应管也有共源极、共漏极和共栅极的放大电路，分析方法也可采用图解法和等效电路法。

5.2.1 共源极放大器

这种放大电路的输入电压加在场效应管的栅极和源极之间，输出电压从漏极和源极之间取出，即输入、输出回路的公共端为场效应管的源极，所以称为共源极放大电路。

1. 场效应管的直流偏置电路

由 FET 组成的放大电路需要合适的静态工作点。由于 FET 是电压控制器件，需要有合适的栅极电压。通常情况下，偏置形式有两种，现以 N 沟道耗尽型 JFET 为例进行说明。

1) 自偏压电路

耗尽型 MOS 管自偏压电路如图 5-13 所示。电路中，由于栅极电流为零，电阻 R_G 上压降近似为零，所以栅极电位为零 ($U_G=0$)。在 $U_{GS}=0$ 时，存在漏极电流 I_D 。所以在图 5-13 中，在无外加栅极电源情况下会有静态漏极电流 I_D ，在源极电阻 R_S 上产生电压降，使源极为正，栅极为负，结果在栅、源之间形成一个负偏置电压，即 $U_{GS}=U_G-U_S=0-I_DR_S=-I_DR_S$ 。这样取得的电压通常称为自偏压。图中电容 C_S 对 R_S 起旁路作用，称为源极旁路电容。

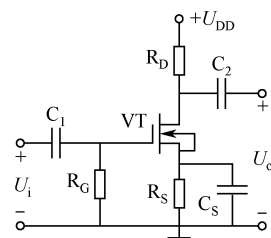


图 5-13 自偏压电路

对于增强型 FET，只有栅-源电压达到开启电压 U_T 时才有漏极电流 I_D ，因此增强型 FET 不能用于图 5-13 所示的自偏压电路。

2) 分压式自偏压电路

分压式自偏压电路如图 5-14 所示。这种偏置方式适用于各类场效应管。由图可以看出，静态时栅极电位 U_G 由 U_{DD} 经电阻 R_{G1} 和 R_{G2} 分压后获得，即 $U_G=U_{DD}R_{G2}/(R_{G1}+R_{G2})$ ，同时漏极电流在源极电阻 R_S 上也产生电压降 $U_S=I_DR_S$ ，因此，静态时加在 FET 上的栅源电压为：

$$U_{GS}=U_G-U_S=U_{DD}R_{G2}/(R_{G1}+R_{G2})-I_DR_S$$

电路中，源极电阻 R_S 具有稳定静态工作点的作用，源极电阻 R_S 越大，其负反馈作用就越强，工作点就越稳定。同时， I_D 也越小，以至于使 g_m 太小，影响放大器的性能。为解决这个矛盾，可采用分压式自偏压放大电路。

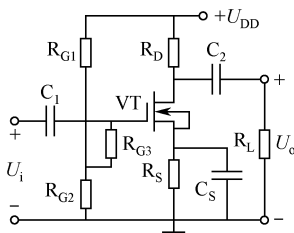


图 5-14 分压式自偏压电路

为了防止接入 R_S 影响电压放大系数，在其两端并联一个旁路电容 C_S 。栅极回路接入一个大电阻 R_{G3} ，目的是提高放大电路的输入电阻。由于栅极没有电流，因此 R_{G3} 上不产生电压降，不影响栅偏压。

2. 共源极放大电路

1) 放大电路的静态工作点

场效应管共源极放大电路也必须设置合适的静态工作点。场效应管是电压控制器件，没有偏流。当输入信号为零时，静态工作点由 U_{GSQ} 、 I_{DQ} 和 U_{DSQ} 确定。

在图 5-15 (a) 所示的共源极放大电路中，由输入回路可知 $U_{GS}=U_{GG}$ ；

由输入回路得到 $U_{DS}=U_{DD}-I_D R_D$ 。

2) 直流负载线

为画出放大器的直流负载线，可以找到两个特殊点：

- (1) 令 $I_D=0$ 时， $U_{DS}=U_{DD}$ ；
- (2) 令 $U_{DS}=0$ 时， $I_D=U_{DD}/R_D$ 。

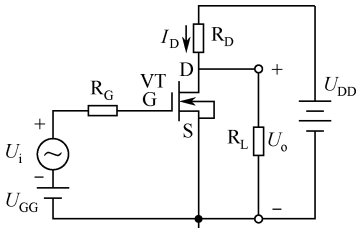
连接这两点即可得到共源放大电路的直流负载线，如图 5-15 (b) 所示。直流负载线与输出特性曲线中 $U_{GS}=U_{GSQ}=U_{GG}$ 的一条曲线的交点，即为所求的静态工作点 Q。Q 点确定以后，则可以从输出特性曲线上得到 I_{DQ} 和 U_{DSQ} ，如图 5-15(b) 中所示。

3) 场效应管的微变等效电路

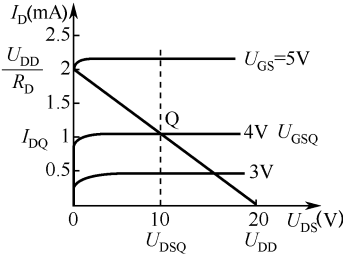
场效应管属于非线性元件，但在小信号工作条件下仍可视为线性，可以利用微变等效电路来分析其交流动态指标。

由于场效应管栅-源之间是绝缘的，输入电流极小，因此可以认为 G、S 之间是断开的，即将输入回路 G、S 之间等效为一个 $r_{gs}=\infty$ 的输入电阻。此外，由场效应管的输出特性可知， I_D 特性曲线基本上是一些彼此平行的直线，其高度受 U_{gs} 控制，栅压 U_{gs} 大， I_D 亦大，因此在小信号工作时，场效应管的输出回路可以等效为一个受栅源电压 U_{gs} 控制的电流源 $I_D=g_m U_{gs}$ 。

图 5-16 是图 5-15 所示共源极放大电路的微变等效电路，可以看出场效应管的等效电路更为简单。由该电路可求出 A_u 、 R_i 、 R_o 三个动态指标。



(a) 基本共源极放大电路原理图



(b) 图解法确定共源极放大电路的 Q 点

图 5-15 基本共源极放大电路及图解法确定共源放大电路的 Q 点

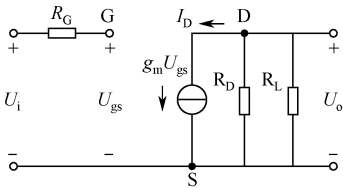


图 5-16 共源极放大电路的微变等效电路

(1) 电压放大系数 (A_u)。由图 5-16 可推导出电压放大系数的表达式为

$$A_u = U_o / U_i = -g_m U_{gs} R'_L / U_{gs} = -g_m R'_L$$

式中 $R'_L = R_D // R_L$ 。

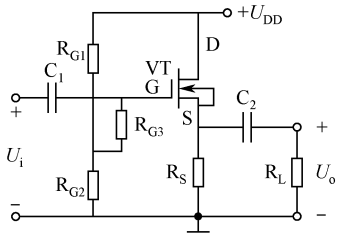
上式表明，场效应管共源放大电路的放大系数与跨导 g_m 成正比，且输出电压与输入电压呈反相，即共源放大电路是倒相电压放大器。

由于场效应管的跨导不大，因此单级放大系数要比共射极放大电路小。

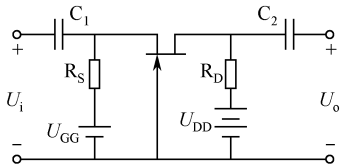
(2) 输入电阻 (R_i) 和输出电阻 (R_o)。由图 5-16 可得，输入电阻 $R_i = \infty$ ；输出电阻 $R_o = R_D$ 。

(3) 共源极放大电路的特点是电压增益大，输出、输入电压反相，输入电阻高，输入电容大，输出电阻由负载电阻 R_D 决定。

5.2.2 共漏极放大器

<p>1) 共漏极放大电路的静态工作点</p> <p>共漏极放大电路如图 5-17 所示。</p> <p>由于 U_{GSQ} 很小, 可忽略, 即 $U_{GQ} \approx U_{SQ} = I_{DQ} R_S$。所以静态工作点的电流和电压分别为 $I_{DQ} = U_G / R_S$; $U_{DS} = U_{DD} - U_{SQ}$。</p>	 <p>图 5-17 共漏极放大电路</p>
<p>2) 共漏极放大电路的交流参数</p>	<p>(1) 电压放大系数 $A_u = g_m (R_D // R_L) / [1 + g_m (R_D // R_L)]$</p> <p>当 $g_m (R_D // R_L) \gg 1$ 时, $A_u \approx 1$, 可见共漏极电路属于电压跟随器。因为共漏极放大电路电压放大系数 $A_u \approx 1$, 输入输出电压同相, 输出信号取自源极, 所以共漏极放大电路也称源极输出器。</p> <p>(2) 输入电阻 $R_i \approx R_{G3} + (R_{G1} // R_{G2})$。</p> <p>(3) 输出电阻 $R_o = R_S // (1/g_m)$。即共漏极电路的输出电阻 R_o 等于源极电阻 R_S 和跨导的倒数 $1/g_m$ 相并联, 所以输出电阻 R_o 较小。</p>
<p>3) 共漏放大电路的特点</p>	<p>(1) 电压增益小于 1, 但接近 1。</p> <p>(2) 输入输出电压同相。</p> <p>(3) 输入电阻高, 输入电容小。</p> <p>(4) 输出电阻小, 可用于阻抗变换。</p>

5.2.3 共栅极放大器

<p>1) 电路原理图</p> <p>共栅极放大电路如图 5-18 所示。</p>	 <p>图 5-18 共栅极放大电路</p>
<p>2) 共栅极放大电路的主要参数</p>	<p>(1) 电压放大系数: $A_u \approx g_m R_D$。</p> <p>(2) 输入电阻: $R_i = R_S // 1/g_m$。</p> <p>(3) 输出电阻: $R_o = R_D // r_d [1 + g_m (R // R_S)]$。式中 R 为信号源内阻。</p>
<p>3) 共栅极放大电路的特点</p>	<p>(1) 电压增益小。</p> <p>(2) 输入输出电压同相。</p> <p>(3) 输入电阻小, 输入电容小。</p> <p>(4) 输出电阻大。</p> <p>(5) 共栅极放大电路因栅极与沟道之间的高阻未发挥作用, 实际中很少使用。</p>

5.3 其他场效应管

场效应管的名称来源于生产厂家、制造工艺和内部结构，并根据不同的结构和功能特点应用于不同的场合。

5.3.1 VMOS 和 TMOS 场效应管

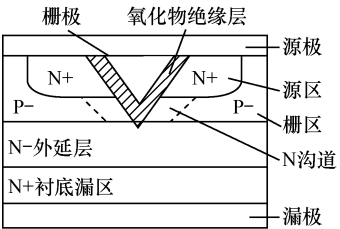
1. 沟槽栅结构

功率场效应管大都采用垂直沟道和槽栅结构，简称沟槽栅结构。

横向沟道结构	栅极（栅区）、源极（源区）和漏极（漏区）大致排列在一条直线上，这样的结构被称为横向沟道结构，普通 MOSFET 多采用此结构。
平面栅结构	栅区、源区和漏区的分界面大致也是平面状的栅极结构称为平面栅极结构。 平面栅极结构的优点是结电容小，较适合于高频小功率应用；缺点是源极和漏极相距比较远，导电沟道的宽度有限，不太适合大功率场合。
V 形槽栅结构	V 形槽栅结构能够增加栅区与源区和漏区的接触面积，增加对电流的控制能力。
垂直沟道结构	垂直沟道结构是将源极和漏极配置在栅极的一侧，漏极和源极相向排列，这样的沟道结构缩短了沟道长度，适合于大电流的应用。

2. VMOS 场效应管

VMOS 场效应管（全称为 V 形槽 MOS 场效应管，也称功率 MOSFET，缩写 VF）是在一般 MOS 场效应管的基础上发展起来的、适合在大功率场合应用的场效应晶体管。目前已在高速开关、电压放大、射频功放、音响、电机调速、开关电源和逆变器等领域中获得广泛应用。

<div>1) VMOS 场效应管结构</div> <div>VMOS 管和一般 MOS 管一样，也分为 N 型沟道和 P 型沟道两种、增强型和耗尽型四类，分类特征与一般的 MOS 管相同。VMOS 的典型结构示意图（N 沟道）如图 5-19 所示。</div>	<div></div> <div>图 5-19 N 沟道 VMOS 的结构示意图</div>
<div>2) VMOS 场效应管的特点</div>	<div>(1) 输入阻抗高。由于栅-源之间是 SiO₂ 层，其直流电阻基本上就是 SiO₂ 绝缘电阻，一般可达 100MΩ 左右；交流输入阻抗基本上就是输入电容的容抗。</div> <div>(2) 驱动电流小。由于输入阻抗高，VMOS 管是一种压控器件，一般有电压就可以驱动，所需的驱动电流极小，一般在 0.1μA 左右。对驱</div>

2) VMOS 场效应管的特点	<p>动电路无特殊要求。</p> <p>(3) 跨导线性好。具有较大的线性放大区域和较低的失真。</p> <p>(4) 结电容无变容效应。VMOS 管的结电容不随结电压的变化而变化，无一般晶体管结电容的变容效应，可避免由变容效应导致的失真。</p> <p>(5) 频率特性好，开关速度快。由于没有少数载流子的存储延迟时间，加上极间电容较小，所以具有较高的开关速度，工作频率高可达 600MHz。</p> <p>(6) 具有较宽的安全工作区而不会产生热点，并且具有正的电阻温度系数，因此适合进行并联使用。</p> <p>(7) 过载能力强。短时过载能力通常为额定值的 4 倍，具有较高的可靠性。</p> <p>(8) 耐压高，功率大。有的管子耐压可达 1200V 以上，工作电流通常为 1.5~100A，输出功率为 1~250W。如果没有特殊说明，VMOS 通常是指所有的功率 MOSFET，尽管功率 MOSFET 不仅仅是只有 VMOS 一种。</p> <p>(9) 开启电压高。开启电压（即阈值电压或门槛电压）多为 2~6V（一般为 1.5~5V）。当环境噪声较高时，可以选用开启电压较高的管子，以提高抗干扰能力；反之，当噪声较低时，可选用开启电压较低的管子，以降低所需的输入驱动信号电压。</p>
-----------------	--

3. TMOS 场效应管

TMOS 场效应管是同时采用扩散型沟道与垂直沟道（即沟槽栅结构）的功率 MOSFET，是 VMOS 管的改进型。其漏极在基底下、晶片的底部，栅极在多晶硅两氧化层之间，源极金属均匀地覆盖整个工作面。

TMOS 场效应管的主要特点是：具有输入阻抗接近无穷大；电压驱动，输入功率极小，驱动电路简单；开关速度高；关断延迟时间短；漏极与源极间的电阻具有正温度系数；反偏安全工作区大；增益与带宽的乘积大； d_0/d_1 抗扰度高；互导基本为定值；价格便宜等。

5.3.2 DMOS（即 π MOS）场效应管

1. DMOS 场效应管结构

DMOS 与 CMOS 器件结构类似，也有源、漏、栅等电极，但是漏端击穿电压高。DMOS 主要有垂直双扩散金属氧化物半导体场效应管 VDMOSFET 和横向双扩散金属氧化物半导体场效应管 LDMOSFET 两种类型。DMOS 器件是由许多单一结构的 DMOS 单元所组成的。单元的数目是根据一个芯片所需要的驱动能力决定的，DMOS 的性能直接决定了芯片的驱动能力和芯片面积。

DMOS 场效应管采用垂直器件结构，为提高垂直沟道的稳定性而采用了双扩散工艺（注：用 D 表示），以外延层为基础，采用外延扩散工艺陆续生长出“P-”基区和“N+”源区。

因为 DMOS 的栅极区形状和字母“ π ”很相近，因此也称为 π MOS。

DMOS 的结构示意图（N 沟道）如图 5-20 所示。

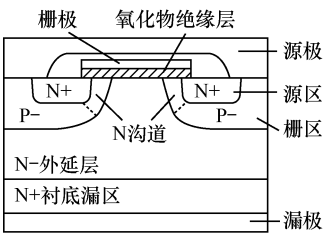


图 5-20 N 沟道 DMOS 的结构示意图

2. 主要参数

1) 导通电阻 ($R_{ds(on)}$)

导通电阻是指在器件工作时，漏极到源极的电阻。对于 LDMOS 器件应尽可能减小导通电阻。当导通电阻很小时，器件就具有很好的开关特性，提供较大的输出电流，从而具有更强的驱动能力。

2) 零栅压漏极电流 (I_{DSS})

栅极电压为零时流入漏极的直流电流。该电流对耗尽型器件是导通电流，对于增强型器件是断态电流。

3) 击穿电压 BV_{DSX}/BV_{DGX}

下标中的 X 表示漏极与源极/漏极和栅极间接一特定电路时漏极-源极/漏极-栅极间击穿电压。

4) 常见型号的封装及主要参数（见表 5-1）

表 5-1 常见 DN 系列器件型号的封装及主要参数

型号与封装		BV_{DSX}/BV_{DGX}	$R_{DS(ON)}(max)$	$I_{DSS}(min)$
TO-92	TO-243AA			
DN2540N3	DN2540N8	400V	25Ω	150mA
DN2535N3	—	350V	25Ω	150mA
DN2530N3	DN2530N8	300V	12Ω	200mA
—	DN3525N8	250V	6Ω	300mA
—	DN3135N8	350V	35Ω	180mA
—	DN3545N8	450V	60Ω	120mA
—	DN3535N8	350V	10Ω	200mA
DN3545N3	DN3545N8	450V	20Ω	200mA

3. 性能特点

- (1) 具有大电流驱动能力。
- (2) 低导通电阻。
- (3) 高击穿电压。
- (4) 结电容小，工作频率高。

4. 应用

广泛用于恒流源、固态继电器、线性放大器、电源电路及通信装置和系统等。

5.3.3 MESFET 场效应管

MESFET（砷化镓金属-半导体-场效应管）是用肖特基势垒代替 JFET 的 PN 结而制成是另一种功率 FET。

1. 图形符号

MESFET 的图形符号如图 5-21 所示。

2. 结构

MESFET 的结构是在半导体材料 GaAs 的衬底上成 N 沟道,然后在 N 沟道两端利用光刻、扩散等工艺制成高掺杂浓度的 N⁺区,分别组成漏极 D 和源极 S。当 MESFET 的栅极区金属(如铝)与 N 沟道表面接触时,在金属-半导体接触处形成肖特基势垒区。MESFET 虽然也采用了横向沟道,但比 MOSFET 的沟道更短。

MESFET 的结构示意图如图 5-22 所示。

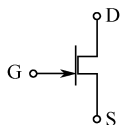


图 5-21 MESFET 的图形符号

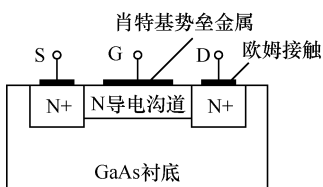


图 5-22 MESFET 的结构示意图

由于 MESFET 采用了肖特基势垒栅极结构,就 PN 结的特性而言,与肖特基二极管并无本质上的区别,因为肖特基势垒的基本结构就是金属-半导体, MESFET 也由此得名。

3. 类型

通常 MESFET 分为增强型和耗尽型两类。实际中的 MESFET 几乎都是 N 沟道,因为 P 沟道 MESFET 的空穴迁移率很低,不具有 N 沟道器件的高速特性,所以几乎不用。

4. 特点

- (1) MESFET 的肖特基势垒栅极与 MOS 栅极相似。
- (2) MESFET 的肖特基势垒区也要求外加反偏电压。电压 U_{GS} 越负,肖特基势垒区越宽, N 沟道的有效截面积越小,沟道电阻越大。
- (3) 漏极电流 I_D 随 U_{GS} 变化而变化。
- (4) MESFET 的输出特性与硅 JFET 相似,属于耗尽型器件,有一夹断电压 U_P 。
- (5) MESFET 的肖特基势垒栅极采用的材料是半导体砷化镓 (GaAs), GaAs 的电子迁移率比硅约大 5~10 倍。用 GaAs 制造有源器件时,具有比硅器件快得多的转换速度。

5. 应用

MESFET 主要作为功率微波器件用在发射机上,工作频率可达 45GHz 以上。

5.3.4 TFT 场效应管

薄膜场效应晶体管（简称 TFT 器件，也称 TFT 开关管）是基于场效应管的原理制成的，是一种利用电场效应来控制电流的、特殊的 MOSFET。因为内部参与导电的只有一种极性的载流子，所以 TFT 器件也是一种单极性器件。

1. 类型

TFT 器件主要有非晶硅和多晶硅两种类型，其中多晶硅类尚处于起步阶段。

2. 四种结构

TFT 器件是在玻璃基板等衬底上首先制作一层半导体薄膜，然后再在薄膜上形成场效应晶体管，所以此类管称为薄膜场效应晶体管。通常非晶硅 TFT 主要由玻璃基板、栅电极、栅绝缘层、半导体活性层非晶硅、欧姆接触层 N+非晶硅、源极、漏极及保护膜等组成，其中栅绝缘层和保护膜一般采用氮化硅（SiN₂）材料。

非晶硅 TFT 有四种典型结构：

- （1）源、漏、栅三电极位于半导体活性层非晶硅同一侧的平面结构，其中源、漏、栅三电极位于非晶硅层上侧的称正栅平面结构。
- （2）源、漏、栅三电极位于非晶硅层下侧的称倒栅平面结构。
- （3）源、漏电极与栅电极位于非晶硅层两侧的称为交错结构，其中栅极在非晶硅层上侧，源、漏电极在非晶硅层下侧的称正栅交错结构或顶栅结构。
- （4）源、漏电极与栅电极位于非晶硅层两侧的交错结构，其中栅极在非晶硅层下侧，源、漏电极在非晶硅层上侧的称倒栅交错结构或底栅结构，如图 5-23 所示。

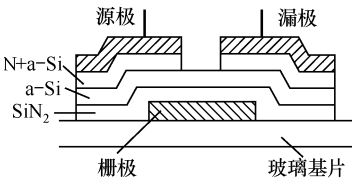


图 5-23 a-Si TFT 倒栅交错结构示意图

3. 三个电极

TFT 器件有源极 S（相当于三极管的发射极 e）、栅极 G（相当于三极管的基极 b）和漏极 D（相当于三极管的集电极 c）三个电极。

4. 工作原理

TFT 器件工作时，犹如电压控制的双向开关。当栅极 G 不施加电压时，TFT 器件处于截止状态（关断状态），即源极 S 与漏极 D 不能接通。此时栅极 G 与源极 S（或漏极 D）之间的电阻称为关断电阻 r_{off} 。

由于栅极 G 的漏电流极小或为零，所以 r_{off} 非常高，一般在 $10^7\Omega$ 以上。当在栅极 G 上施加一个大于其导通电压的正向电压时，由于电场的作用，TFT 器件将处于导通状态，即源极 S 与漏极 D 接通。此时源极 S 与漏极 D 之间的电阻称为导通电阻 r_{on} ，它随栅极电压的增

加而减小。

TFT 器件的源极 S 和漏极 D 功能可以互换。源极 S 和漏极 D 之间的电流方向随它们之间电场方向的变化而变化。源极和漏极是在具体应用电路中被定义的,一般将输入信号端称为源极 S,将输出信号端称为漏极 D。在 TFT 液晶显示屏中,一般将数据驱动器端接 TFT 器件的源极 S,像素端接 TFT 器件的漏极 D。

5. 主要特点

(1) 输入阻抗高。TFT 器件是电压控制器件,它的输出电流决定于输入电压的大小,基本上不需要信号源提供电流,所以它的输入阻抗很高,有的可达 $10^{15}\Omega$ 。

(2) 噪声低。

(3) 功耗小。适合用于制造高密度的大规模和超大规模集成电路。

(4) 温度稳定性好。器件的电参数较稳定,不易随温度的变化而变化。

(5) 抗辐射能力强。

(6) 开关速度快,高频特性好。

6. 应用

(1) LCD 显示器驱动。TFT 器件常用于矩阵驱动方式的彩色 LCD 的驱动电路中,构成有源矩阵 LCD。液晶显示器上的每个液晶像素点都是由集成在其后的薄膜晶体管来驱动的,如图 5-24 所示。

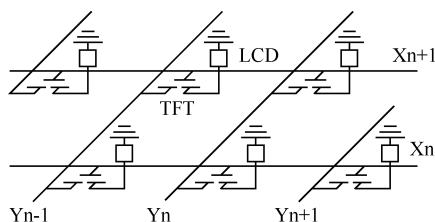


图 5-24 TFT 在 LCD 内的配置方式示意图

(2) 手机高端彩屏驱动。高端彩屏手机中普遍采用 TFT 驱动显示屏,可分 65536 色、26 万色和 1600 万色三种,其显示效果都非常好。

(3) 用于液晶投影仪。用于液晶投影仪的 TFT 芯片阵列的分辨率为 XGA 时,含有百万个像素;分辨率为 SXGA 时,含有 1280×1024 像素。




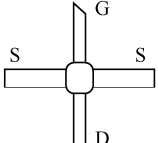
(4) 有机电致发光显示屏驱动。薄膜晶体管广泛用在有机电致发光 (TFT-OLED) 平板显示器的驱动电路中。

(5) 笔记本电脑显示器驱动。笔记本电脑的显示器的驱动电路的主要器件也是 TFT。

5.4 场效应管的识别与检测

场效应管来源多,型号多,命名方法也不尽相同。正确识别、检测各类场效应管是使用过程中必须解决的实际问题。

5.4.1 场效应管的识别

1) 按场效应管的命名法进行识别	<p>(1) 第一种命名方法与双极型三极管相同</p> <p>第一位是数字，固定为 3，代表有三个电极。</p> <p>第二位用字母表示材料，具体含义为：D—表示是 P 型硅 N 沟道；C—表示是 N 型硅 P 沟道。</p> <p>第三位用字母表示，具体含义为：J—代表结型场效应管；O—代表绝缘栅型场效应管。</p> <p>例如，3DJ2D 是结型 N 沟道场效应管，3DO2E 是绝缘栅型 N 沟道场效应管。</p>
	<p>(2) 第二种命名方法</p> <p>场效应管的型号是 CS××#。</p> <p>其中，CS—代表场效应管；××—为数字，代表型号的序号；#—用字母表示，代表同一型号中的不同规格，如 CS11C、CS47G 等。</p>
2) 按场效应管常用封装形式识别	<p>场效应管的封装形式有许多种，主要是采用金属壳封装和塑料封装，有插脚型和贴片型两种类型。常见封装形式有以下几种。</p> <p>(1) P-DIP：为塑料封装双列直插式。</p> <p>(2) CER-DIP：为陶瓷封装双列直插式。</p> <p>(3) Chip：为小片型封装。</p> <p>(4) SMD：为表面封装。</p> <p>(5) LLCC：为无引线陶瓷芯片载体封装。</p> <p>(6) Wafer：为裸芯片。</p> <p>(7) SP：为特殊外形封装。</p>
3) 场效应管的引脚识别	<p>(1) 常见国产场效应管</p> <p>常见国产场效应管的引脚排列如图 5-25 所示。</p> <div><div><p>3DJ 引脚</p></div><div><p>3CO 3DO 系列</p></div><div><p>结型</p></div><div><p>绝缘栅型</p></div></div> <p>图 5-25 常见国产场效应管的引脚排列</p> <p>(2) 常见国外场效应管</p> <p>常见进口场效应管的引脚排列如图 5-26 所示。</p> <div><div><p>2N2499 引脚排列</p></div><div><p>2SK1976</p></div><div><p>1RF5533</p></div><div><p>2SK1407</p></div><div><p>TM5N60</p></div></div> <p>图 5-26 常见进口场效应管的引脚排列</p>

5.4.2 场效应管的检测

1) 防静电	在检测场效应管时，对于小功率的 MOSFET 需要特别注意防静电的问题，检测前应采用各种方法泄放掉检测者身上的静电，避免因静电的存在而损坏小功率的 MOSFET。对于大功率 MOSFET 也需要考虑防静电的问题。
2) 结型场效应管的引脚检测 将万用表量程置于 $R \times 1k\Omega$ 挡。	<p>(1) 反复测试结型场效应管的三个电极，只要其中两脚的正反向电阻值相等，约为几千欧，这两脚必定是漏极 D 和源极 S。</p> <p>(2) 用黑表笔与栅极相接，再用红表笔分别去碰触另外两个电极，若两次测得的电阻值均很小（几千欧至几十千欧），说明测得的是 PN 结的正向电阻值，被测管属于 N 沟道场效应管。若两次测出的电阻值均很大，则表明测得的是 PN 结的反向电阻值，被测管属于 P 沟道场效应管。</p> <p>漏极和源极可以互换使用，无须进行区分。</p>
3) 结型场效应管放大能力的检测（以 N 沟道场效应管为例） 将万用表拨到 $R \times 1k\Omega$ 挡。	<p>(1) 红表笔接源极 S，黑表笔接漏极 D，相当于给场效应管加上 1.5V 的电源电压。此时表针指示的是 D-S 极间电阻值。然后用手指捏栅极 G，将人体的感应电压输入。由于管子的放大作用，U_{DS} 和 I_D 都将发生变化，也相当于 D-S 极间电阻发生变化，若表针有较大幅度的摆动，说明管子具有较强的放大能力。若指针不摆动，则说明管子已无放大能力，不可再用。</p> <p>(2) 管子每测一次，G-S 极的 PN 结上都会充有少量电荷，建立起电压 U_{GSS}。如果再继续测试，需将 G-S 极间短路一下之后再继续测量。</p>
4) MOS 绝缘栅型场效应管电极的判断 将万用表拨到 $R \times 100\Omega$ 挡。	<p>(1) 假设被测管子的某引脚为栅极，用黑表笔与它相连，再用红表笔分别碰触另外两个电极，若两次测得的电阻为无穷大，交换表笔测试电阻还是无穷大，则表明假设的栅极是真正的栅极 G。但这个结果对增强型 MOS 管不一定准确，因此还必须进行检验。</p> <p>(2) 确定栅极后，再将两表笔分别接到漏、源极，让栅极悬空。如果万用表指针有轻微摆动，则证明测试结果是正确的；若万用表指针不摆动，必须重新假设栅极并进行测试。</p> <p>(3) 确定栅极后，还需对漏极 D 和源极 S 进行判断。对于耗尽型 MOS 管来说，找到栅极后，测量漏极和源极之间的电阻值，在几百欧到几千欧内，并且正反向电阻值略有差异，阻值略小的那一次，黑表笔接的是漏极 D，红表笔接的是源极 S。</p> <p>(4) 有些场效应管的源极 S 与外壳是连在一起的，更容易判别。</p> <p>(5) 测试结束后，应将场效应管的引脚绞合在一起或放在金属箔中，及时泄放掉栅极上的电荷，以防栅极产生很高的电压击穿场效应管。</p>
5) MOS 绝缘栅型场效应管质量好坏的判断	<p>(1) 耗尽型 MOS 管的判断</p> <p>若测的 G-D、G-S 间正反向电阻值为无穷大，说明被测管子的绝缘性能良好，如果测得的阻值较小，说明被测管子已经击穿；测得 D-S 间电阻值在几百欧到几</p>

将万用表拨到 $R \times 100\Omega$ 挡。	千欧为正常。若 D-S 间的电阻值很大或很小，说明漏、源极间已断开或短路，被测管子已损坏。
	<p>(2) 增强型 MOS 管的判断</p> <p>在确定栅极无感应电压的情况下，测 G-D、G-S、D-S 间的正反向电阻值均为无穷大时被测管子正常；如果阻值较小，则表明被测管子已损坏。</p> <p>让栅极 G 悬空，万用表的表笔接 D、S，若指针有摆动，表明被测管子是好的。</p>
6) MOS 绝缘栅型场效应管放大能力的判断(以 N 沟道 MOS 管为例) 将万用表拨到 $R \times 100\Omega$ 挡。	<p>(1) 黑表笔接 D 极，红表笔接 S 极，让 G 极悬空。当手指碰触一下 G 极，若表针有较大的偏转，说明管子具有放大作用；若用手捏住栅极，指针偏转越大，则表明其放大能力越强。若指针偏转较小，甚至根本不偏转，则表明该管子的放大能力弱或已损坏。</p> <p>(2) 在测试过程中，若不用手指而改用手持螺丝刀绝缘柄，用螺丝刀的金属杆去碰触被测管子的栅极，效果是一样的；但降低了人体测试灵敏度，也降低了管子被击穿的危险。</p> <p>(3) 在上述过程中，若用塑料制作的笔套(管)，经摩擦头发、化纤或棉布产生静电后，由远及近靠近栅极，也能使万用表的指针发生偏转，而且距离越近，指针偏转越大，表明管子放大能力越强。但必须注意，不能将塑料笔套与栅极 G 直接相碰，否则极有可能烧毁管子。</p> <p>(4) 在测试时，如果塑料笔套靠近栅极，甚至已接触栅极时，万用表指针仍不动，说明被测 MOS 管已经损坏。</p>

5.5 场效应管的应用电路

5.5.1 场效应管在电源电路中的应用

1. 场效应管使用注意事项

<p>(1) 在使用 MOS 场效应晶体管时应注意类型，不能随意互换。</p> <p>(2) MOS 场效应晶体管的输入阻抗高(包括 MOS 集成电路)，极易被静电击穿，使用时应特别注意防静电，具体注意事项如下。</p> <p>① MOS 器件出厂时通常装在导电泡沫塑料袋中，也可用细铜线把各个引脚连接在一起，或用锡纸等防静电措施进行包装；不能随意乱放。</p> <p>② 取出的 MOS 器件不能在塑料板上滑动及摩擦，以免产生静电，应用金属盘来盛装器件。用手去拿，要先接触金属等消除静电后方可。</p> <p>(3) 焊接用的电烙铁必须接地良好，以屏蔽交流电场，最好烙铁断电后再进行焊接。</p> <p>(4) 焊接前应把电路板的电源线与地线短接，待 MOS 器件焊接完成后再次分开。</p> <p>(5) MOS 器件各引脚的焊接顺序应是漏极、源极、栅极。拆卸时顺序应相反。</p>

- (6) FET（包括结型和 MOS 型）通常漏极和源极可以互换，但有些产品出厂时已将源极与衬底连在一起，这时源、漏极不能对调使用。还有的 FET 内有体二极管，使用时必须注意。
- (7) MOS 场效应晶体管的栅极在允许条件下最好接入保护二极管。在检修电路时应注意检查原有保护二极管是否损坏。

2. 场效应管在开机电路中的应用

采用 P 沟道 MOS 管 SI2305 对电源的开启进行控制的电路如图 5-27 所示。在其栅极加上电压（高电位）后，漏-源极就关断，去掉电压（低电位）漏-源极就导通。

1) 电路原理图（见图 5-27）

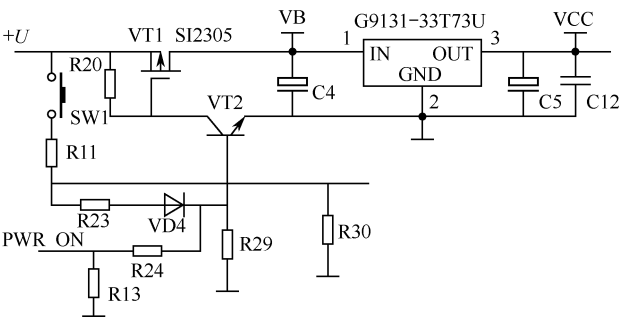


图 5-27 电源开机电路原理图

图中，+U 电压接到场效应管 VT1 的源极，又通过 R20 电阻给栅极提供了一个正极性电压，由于 VT1 是一个 P 沟道管，所以其漏-源极不能导通，电压不能通过，3V 稳压 IC 输入脚 1 得不到电压，所以电路不能开机。

2) 工作原理

当按下 SW1 开机按键时，正极性电压通过按键 SW1、R11、R23、VD4 加到三极管 VT2 的基极，三极管 VT2 的基极得到一个正电压，三极管就导通了。导通了的 VT2 就相当于把 VT1 的源极直接接地，VT1 的源极从高电位变为低电位，VT1 就导通。+U 电压就从 VT1 通过加到稳压 IC 的输入脚，3V 稳压 IC 就输出 3V 的工作电压 VCC 供给主控电路。

主控电路通过复位清零（并完成读取固件程序等一系列动作），输出一个控制电压到 PWR-ON 端，再通过 R24、R29 分压后送到 VT2 的基极，使 VT2 一直处于导通状态，即使松开开机键 SW1，仍有主控送来的控制电压保持着 VT2 一直处于导通状态，VT1 就能持续地给 3V 稳压 IC 提供工作电压，实现了开机控制。

3. 在 TC2175GD 型彩电电源中的应用

TC2175GD 型彩电电源电路如图 5-28 所示。图中，电路中场效应管 VT1 作电源开关管。集成电路 MC44608P75 内置 75kHz 振荡器、恒流源、驱动放大输出电路，具有过压、过流保护电路。电源的输出主电压为 110V，是一种小型节能、高效的开关电源。

1) 电路原理图 (见图 5-28)

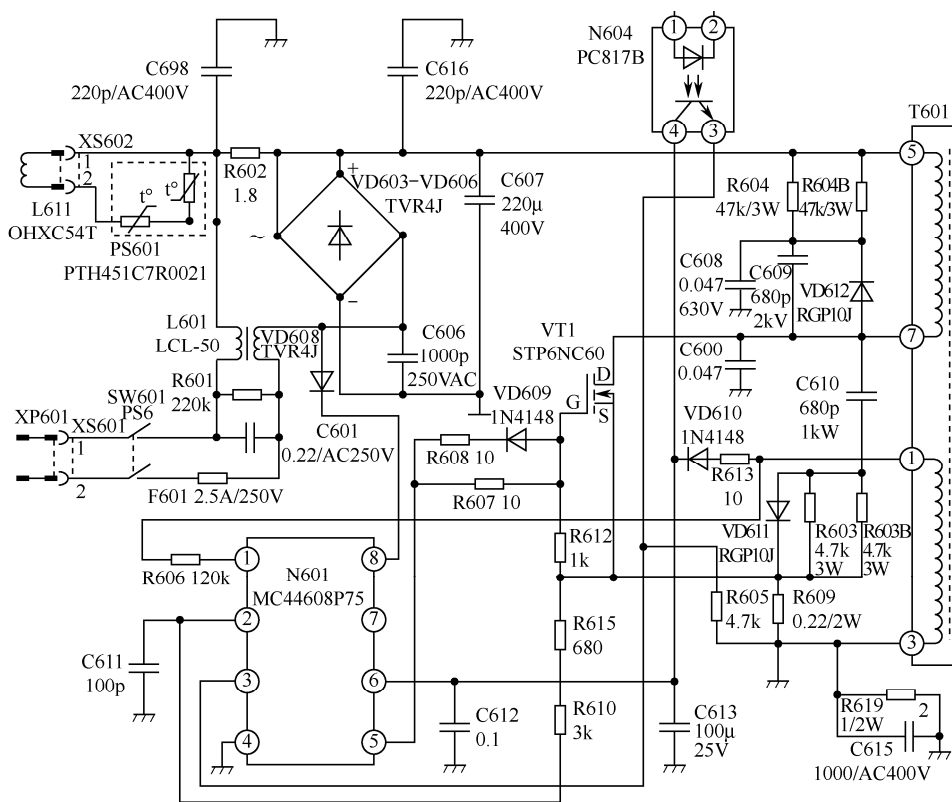


图 5-28 TC2175GD 型彩电电源电路

2) 工作原理

开机后, 由变压器主绕组 220V 交流电经过桥式整流电路后, 在 C607 上建立 300V 的直流电压。300V 的直流电经开关变压器⑤、⑦绕组后, 送到 VT1 的漏极 (D)。同时 220V 交流电经过 VD608 半波整流后给集成电路 N601 的⑧脚供电, 经内部的恒流源电路对⑥脚外接电容 C613 充电, 充电电流约为 9mA, 在充电结束时, C613 上建立起 13V 的工作电压。C613 充电结束后, N601 内部的 75kHz 振荡器开始工作, 产生锯齿波脉冲和矩形脉冲波, 锯齿波脉冲经过运算放大器后转为 PWM 控制信号。PWM 信号经锁定开关控制、缓冲放大器放大后, 从⑤脚输出送到 MOS 管 VT1 的栅极 (G), 驱动 VT1 工作。

N601 内部的振荡器工作后, C613 上的电压会因为驱动输出激励信号而下降到 10V 左右。当 VT1 工作后, 次级绕组①、③将提供一工作电压, 该电压经过 VD610 整流后叠加在 C613 上, 使 C613 上的电压升高并恢复到正常值, 继续为 N601 提供稳定的工作电压, 保证电源电路正常工作。如果在第一次起振结束时, 变压器次级①、③绕组产生的工作电压没有加到 C613 上, 或者产生的感应电压不足时, C613 上的电压会继续下降, 当电压下降到 6.5V 时, 220V 电压经⑧脚内部的恒流源电路重新对⑥脚外接电容 C613 充电, 重复上面的工作过程, 直到电源启动, 电源启动后 N601 内部的恒流源电路停止对 C613 充电。

图 5-28 中, 振荡调制块 N601 (脉宽调制控制) ⑤脚输出驱动信号后, 控制场效应管 VT1 工作在开关状态, 开关变压器 T601 的次级感应出交流信号后, 经整流滤波向其他电路提供直流电压。

5.5.2 场效应管在逆变电路中的应用

1. 直流 12V 转交流 220V 逆变器电路

逆变器电路如图 5-29 所示。电路是由 MOS 场效应管、普通电源变压器为主构成的一个直流 12V 转交流 220V 的逆变器电路。其输出功率取决于 MOS 场效应管和电源变压器的功率。

1) 电路原理图（见图 5-29）

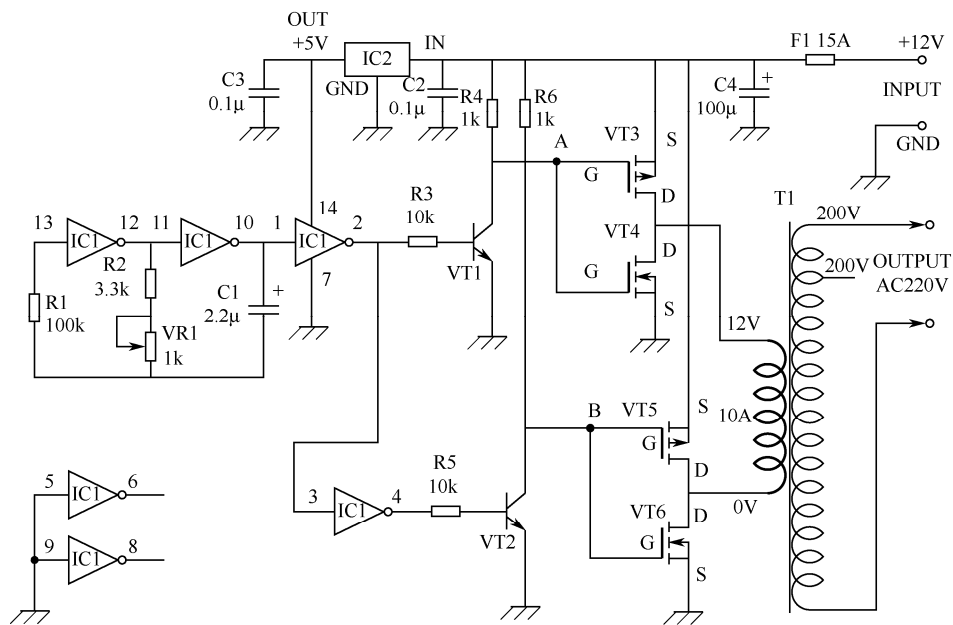


图 5-29 直流 12V 转交流 220V 逆变器电路

图中，由六反相器 CD4069 产生的方波信号由 2 脚输出，经 VT1 和 VT2 放大电路分别放大后，在 A、B 两点获得了一对极性相反的信号(CD4069 的 2 脚与 VT2 基极间加入了一级反相器)，分别用来驱动 VT3、VT4 和 VT5、VT6 的工作。

2) 工作原理

该电路将两个增强型 P 沟道 MOS 场效应管和两个增强型 N 沟道 MOS 场效应管分别组合在一起使用。当输入端为低电平时，P 沟道 MOS 场效应管导通；当输入端为高电平时，N 沟道 MOS 场效应管导通。在图 5-29 电路中，P 沟道 MOS 场效应管和 N 沟道场效应管总是在相反的状态下工作，使流过 T1 低压侧绕组的电流在 A 点低电位、B 点高电位时 (VT3、VT6 导通，VT4、VT5 截止) 由上向下流；在 A 点高电位、B 点低电位时 (VT4、VT5 导通，VT3、VT6 截止) 由下向上流，电流通路如图 5-30 所示。图中的“×”表示管子处于关闭状态。

然后，通过 T1 高压侧绕组感应出 220V 交流电压，完成了直流到交流的转换过程。

电路中，其他两个反相器的输入端接地，以避免干扰其他电路，如图 5-29 左下角 IC1 的 5、6 和 8、9 脚所示。

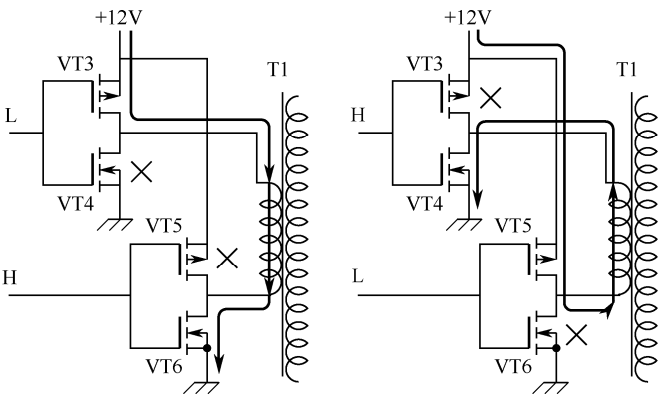


图 5-30 场效应管在高、低电位驱动时的电流通路

2. 基于定时器 NE555 的逆变电路

该逆变电路如图 5-31 所示。

1) 电路原理图（见图 5-31）

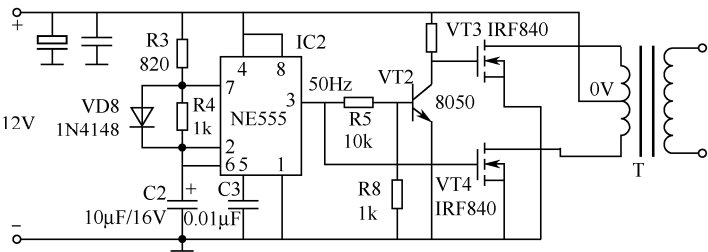


图 5-31 基于 NE555 的逆变电源电路

图中，NE555 的 3 脚输出信号一路直接送 VT4 栅极，另一路由 VT2 反向后送 VT3 栅极。

2) 工作原理

工作时，VT3 和 VT4 轮流导通，使输入变压器 T 的电流反向上下交替，变压器便输出交流电压，实现了由直流 12V 变交流电的逆变器功能。输出交流电压的大小取决于变压器两边绕组的匝数比。逆变器电路的输出功率取决于 MOS 场效应管和电源变压器的额定功率。

5.5.3 场效应管在驱动电路中的应用

1. 场效应管驱动的音响电路

场效应管驱动的 D 类功放电路如图 5-32 所示。

Hi-Fi 音响和家庭影院系统中，输出声道多至 2~6 个，每个声道功率达 20~80W，按以前 A 类、B 类和 AB 类功放效率 30%计算，电源直流功率需达 300 多瓦，而采用 D 类放大器效率可提高到 80%以上，直流功率仅为 125W。

1) 电路原理图 (见图 5-32)

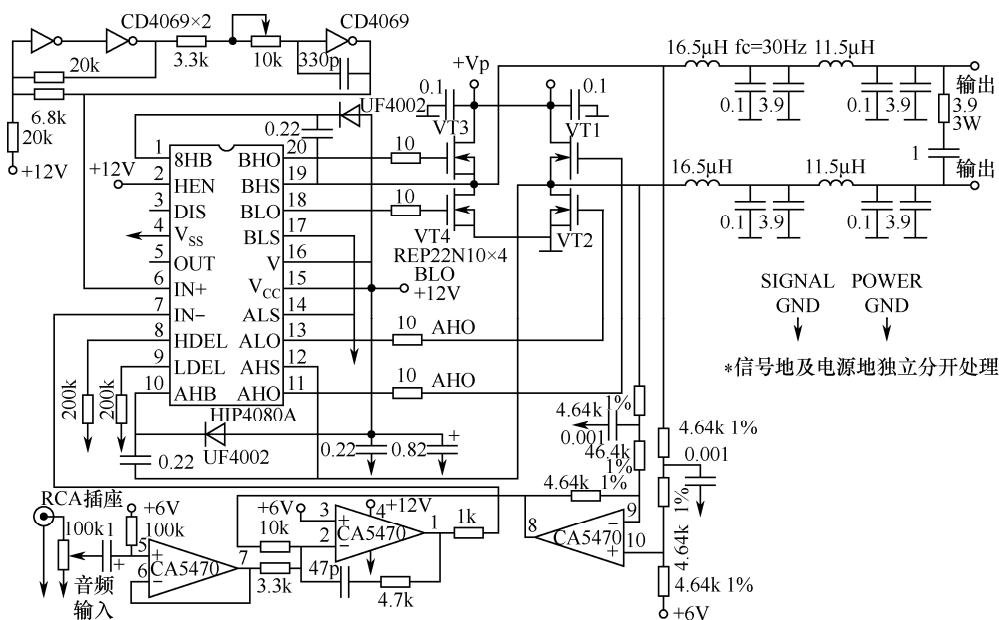


图 5-32 场效应管驱动的 D 类功放电路

图中电路是一种场效应管驱动的 D 类功放电路。D 类放大器有效率高的优点, 可做功率大、体积小、重量轻、省电的音频功率放大器。

2) 工作原理

(1) D 类放大器主要由输入电压放大、脉宽调制、负反馈、功放和 LC 低通滤波器电路组成。图中, HIP4080A 为小型 20 引脚双列直插式 IC 芯片, 其输入有两个端子, 即 IN+6 脚和 IN-7 脚。

(2) 音频信号由 RCA 插座输入, 经 $1\mu\text{F}$ 电容隔直后, 经 5 引脚送至 CA5470 (内含四个运算放大器) 芯片的一组进行电压放大, 然后经 7 引脚送至另一组进行放大, 与负反馈信号综合后, 由 1 脚输出送至 HIP4080A 的 IN- 端。IN+ 端输入的是由三级门电路 CD4069 组成的标准基准三角波, $10\text{k}\Omega$ 电位器起三角波幅值的微调作用。

(3) HIP4080A 将这两个输入信号进行脉宽调制成脉冲波, 即让脉冲波的宽度受音频信号幅度调制, 称为 PWM 信号。调制原理为: 当三角波幅大于音频波幅部分时, 变换电路输出为 “0”; 而三角波幅小于音频波幅时, 变换电路输出为 “1”, 这样就将输入的音频信号变为宽度随音频信号波幅变化的 PWM 波。经脉宽调制后的音频脉冲由两路驱动器输出, A 路包括 ALS、ALO、AHS、AHO, B 路包括 BLS、BLO、BHS、BHO。去推动 4 只功率管 VT1~VT4, 4 只管互相独立交替工作, 即 VT1、VT4 导通时, VT2、VT3 截止, 反之亦然。为防止管子短路贯通, 在 HIP4080A 8 和 9 脚装有管子导通延迟调节电阻 $200\text{k}\Omega$, 相应延时为 $90\sim 100\text{ns}$ 。

(4) 为降低失真和防止过电流, 还加有相应的负反馈和保护电路。负反馈在电路结构上稍有特殊, 反馈信号取自滤波器之前。其原因是由于低通滤波器的滤波作用会形成较大的相位延迟, 在某些频率上容易造成相位改变使放大器工作不稳定, 甚至造成自激。反馈信号经 CA5470 中一组比较放大后, 由其 8 脚输出。过电流保护电路由两路二极管 UF4002 和电

容组成。

(5) 电路中的音频信号由 RCA 插座输入到 CA5470 芯片进行电压放大后，输送至 HIP4080A 的 IN-端，与 IN+输送来的信号综合在 HIP4080A 进行脉宽调制。脉宽调制后的音频脉冲由两路驱动器输出，去推动 4 只功率场效应管 VT1~VT4，4 只场效应管互相独立交替工作，即 VT1、VT4 导通时，VT2、VT3 截止，反之亦然。放大后的脉冲音频电流，经 4 级低通滤波器滤去高频成分，完成 D/A 转换后，送到扬声器发声。

2. 液晶彩电背光驱动电路

液晶彩电背光驱动电路如图 5-33 所示。

1) 电路原理图（见图 5-33）

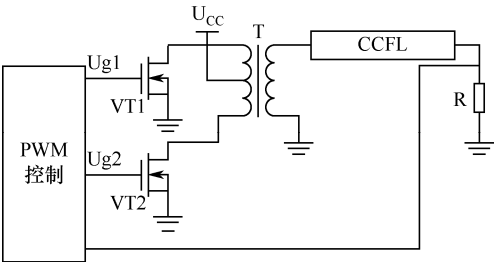


图 5-33 液晶彩电背光驱动电路

2) 工作原理

电路工作时，在 PWM 控制芯片的控制下，使推挽电路中两个开关管 VT1 和 VT2 交替导通，在一次绕组 T 的上下半部分绕组分别形成相位相反的交流电压，通过 T 的次级以驱动 CCFL 冷阴极灯管。改变输入到 VT1、VT2 开关脉冲的占空比，即可以改变 VT1、VT2 的导通与截止时间，从而改变了变压器的储能，也就改变了输出的电压值和背光亮度。

3. 场效应管在直流电动机调速中的应用

在直流电动机调速电路中，常用 N 沟道增强型场效应管组成桥式结构，以实现大功率直流电动机驱动控制。该电路能够满足各种类型直流电动机需求，并具有快速、精确、高效、低功耗等特点。

1) 电路原理图（见图 5-34）

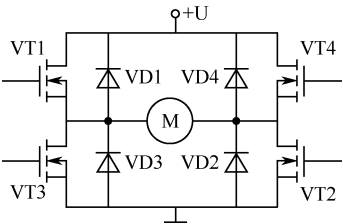


图 5-34 场效应管在电动机驱动电路中的应用

2) 工作原理

桥式驱动电路如图 5-34 所示。其中，4 只场效应开关管都工作在斩波状态。VT1、VT2 为一组，VT3、

VT4 为一组, 这两组状态互补, 当一组导通时, 另一组必须关断。当 VT1、VT2 导通时, VT3、VT4 关断, 此时电动机两端加正向电压实现电动机的正转或反转制动; 当 VT3、VT4 导通时, VT1、VT2 关断, 电动机两端为反向电压, 电动机反转或正转制动。

桥式驱动电路可直接与微处理器接口连接,能应用 PWM 技术实现直流电动机调速控制。

图 5-34 中, 四只开关管皆为续流二极管, 可为线圈绕组提供续流回路。当电动机正常运行时, 驱动电流通过场效应管流过电动机。当电动机处于制动状态时, 电动机工作在发电状态, 转子电流必须通过续流二极管流通, 否则电动机就会发热, 严重时甚至烧毁。

5.5.4 场效应管的其他几种应用电路

1. 场效应管在彩显行激励电路中的应用

图 5-35 所示电路为联想 LX-S556D 型彩显行激励电路, 其核心是由场效应管 VT402 为主构成的。

1) 电路原理图 (见图 5-35)

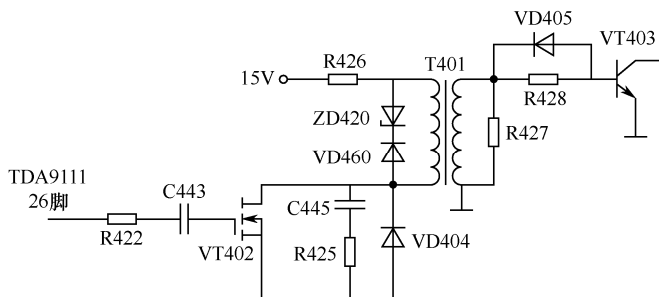


图 5-35 LX-S556D 型彩显行激励电路原理图

2) 工作原理

TDA9111 偏转信号处理器的 26 脚输送来行驱动脉冲信号, 通过 R422、C443 加至场效应行激励管 VT402 的栅极 (G), 其漏极 (D) 输出矩形波, 该矩形波经行激励变压器 T401 的耦合, 使行输出管 VT403 工作在周期性开关状态。

2. 场效应管在手机充电器中的应用

SPN4096A 型手机充电器适用于多种型号手机电池的充电, 其电路采用脉宽调制式开关电源电路, 工作可靠、性能稳定, 适应 85~260V 交流电压输入。

1) 电路原理图

电路原理见图 5-36 所示。B1 为开关变压器，VT1 为开关管（采用场效应管 IRF830），由 VT2、VT3、R5 等组成了脉冲宽度调整电路，通过检测 B1 次级输出电压的高低以调整 VT1 栅极振荡电压。

2) 工作原理

电路大致工作过程为：220V 交流电经 VD1~VD4 整流滤波，在 C1 两端产生+300V 直流电压，该电压经 B1 的 1、2 脚加到 VT1 漏极 D 上，同时经 R2 为 VT1 栅极 G 提供启动电压，使 VT1 导通。B1 次级绕组 3、4 脚及 5、6 脚输出交流电压，B1 的 5 脚输出的交流电经 VD7 整流、C6 滤波后提供输出充电电压。经 VD7 整流、C6 滤波后的直流电压，使稳压管 VD8 反向击

穿,同时经 R11 为 VT4 基极提供电压,VT4 导通,IC1 光耦内发光管有电流通过而发光,IC1 内光耦管兼作 B1 的 3 脚交流电压的整流。光敏管不发光时不起作用。B1 的 4 脚交流电压经 C2、R6 为 VT1 栅极提供反馈脉冲,以使 VT1 振荡工作。VD5 为保护二极管。B1 的 3 脚交流电压经 IC1 整流后通过 R7 加到 VT2 基极、VT3 集电极,VT2、VT3 工作,对 VT1 栅极电压进行脉宽调整。若 C6 两端电压偏高时,IC1 内发光管发光增强,VT2、VT3 导通量增大,VT1 输出脉冲宽度变窄,B1 次级输出电压相应降低;当 C6 两端电压偏低时,同理,VT1 输出脉冲宽度增加,C6 两端电压随之升高始终稳定在 7.8V,从而达到恒压充电的目的。调整 VR1 可调整光耦 IC1 内发光管电流大小,以实现输出电压大小的调整。JP2 脚为充电正电压输出端,在将手机电池插入充电器座时,JP3 脚与手机内电池负极经 R12 接地。

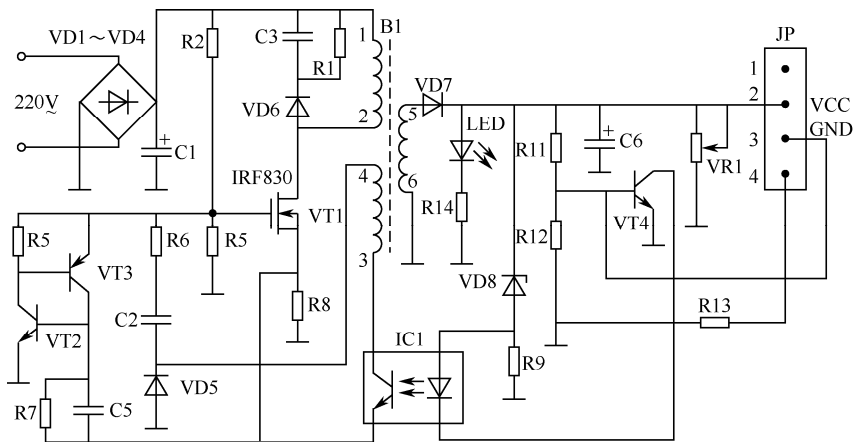


图 5-36 SPN4096A 型手机充电器电路图

3. 串联稳压电源中的场效应管

图 5-37 所示的是利用功率场效应管作调整管的串联稳压电源电路原理图。

1) 电路原理图 (见图 5-37)

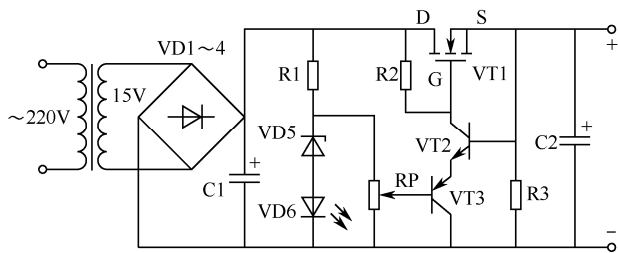


图 5-37 场效应管作调整管的串联稳压电源电路原理图

图中,电容 C1 和 C2 为滤波电容;R1 为限流电阻;VD5 为稳压管,使电源指示灯(即发光二极管 VD6)获得需要的工作电压,同时可为三极管 VT3 提供给定电压;R2 为 VT2 的集电极电阻并给 VT1 提供栅极电压。

2) 工作原理

电路输出的直流电压在 1.25~12V 间连续可调,输出电流 50mA 时,电压波动小于 0.3%,适合各类小电器使用。电路的工作原理和普通串联稳压电源基本相同,只是使用场效应管作

为调整管，不需大电流推动，所以使电路简化，成本较低，而稳压性能却有所提高。

4. 场效应管在 LED 照明灯中的应用

图 5-38 所示的是利用场效应管控制的 LED 照明灯电路。

如果这种小型的 LED 照明灯使用纽扣型锂电池，照明灯的体积可以做得很小，可作为床头阅读灯使用，因为光源使用了白色 LED，所以亮度能满足要求。

1) 电路原理图（见图 5-38）

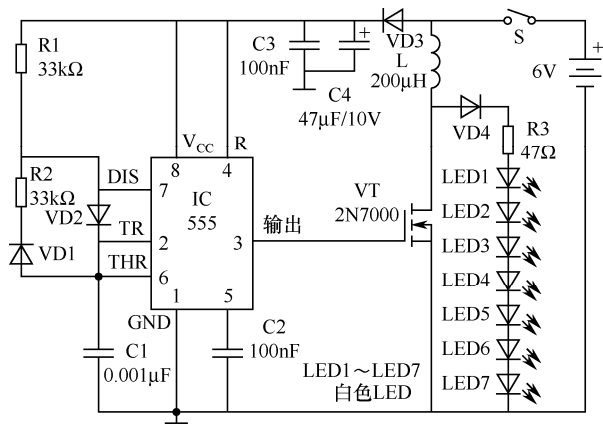


图 5-38 利用场效应管控制的 LED 照明灯电路

电路中 LED 是串联供电的，需要比较高的电压才能点亮 LED 灯串，因此需要一个振荡器做成升压开关电源的形式将 6V 低电压升高到 LED 灯串所点亮的电压。这里使用 NE555 芯片接成多谐振荡器，其输出为电路提供开关信号。

2) 工作原理

合上电路开关 S，由计时器 555（即 IC）构成的多谐振荡电路经 VD3 得到 6V 电压开始工作。振荡的输出使 MOSFET 场效应管 VT 交替导通和截止，切换频率约为 22kHz。在 VT 导通期间，流经电感 L 的电流逐渐增加，电感 L 开始储存能量。在 VT 截止后，储存在电感 L 中的电磁能量驱动七只串联的发光二极管（即 LED 串），并使这些 LED 串导通发光。

5.6 IGBT 的原理及应用

5.6.1 IGBT 的基本知识

绝缘栅双极型晶体管（缩写 IGBT）是一种集功率 MOSFET 的高速交换功能和双极型晶体管的高电压、大电流处理能力于一体的新型自关断器件。

1. 符号

1) 文字符号

绝缘栅双极型晶体管的文字符号是 V、VT，也有的用 IGBT、Q、T 等表示的。

2) 图形符号（见图 5-39）

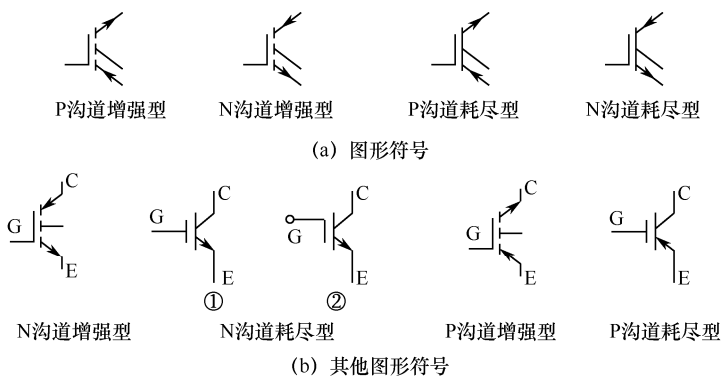


图 5-39 IGBT 的图形符号

2. 常见 IGBT 外形（见图 5-40）



图 5-40 绝缘栅双极性晶体管

3. 结构

绝缘栅双极型晶体管（IGBT）是由绝缘栅型场效应管和双极型晶体管相结合构成的全控型电压驱动式功率半导体器件。IGBT 的主体部分与 GTR（又称电力晶体管、巨型晶体管）相同，也有集电极 C、发射极 E 和门极 G（又称控制极、栅极）。

1) 结构特点

IGBT 的结构特点如图 5-41 所示。

2) 等效电路

绝缘栅双极型晶体管的等效电路如图 5-42 所示。

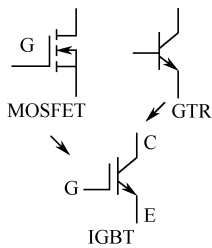


图 5-41 IGBT 的结构特点

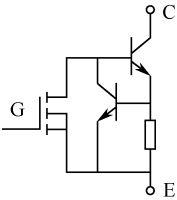


图 5-42 IGBT（N 沟道、耗尽型）的等效电路

3) 实际结构（N 沟道）

绝缘栅双极型晶体管本质上是一个场效应晶体管，在结构上与功率 MOSFET 相似，只是在功率 MOSFET 的漏极和衬底之间额外增加了一个 P+型层。其实际结构如图 5-43 所示。

在 N 沟道增强型绝缘栅双极型晶体管结构中，N+区称为源区，在其上引出的电极称为发射极。P+区称为漏区，引出的电极为集电极，从器件控制区（即栅区）引出的电极称为门极。

在紧靠栅区的边界形成沟道，在漏、源之间的 P 型区（包括 P+和 P-区）称为亚沟道区；在漏区另一侧的 P+区称为注入区，它是 IGBT 特有的功能区；注入区、漏区和亚沟道区一起形成 PNP 双极晶体管。

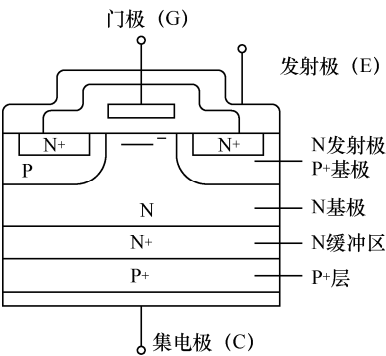


图 5-43 IGBT (N 沟道) 结构示意图

4. 特点与应用

1) 特点

它具有输入阻抗高、电压控制、功耗低、控制电路简单、耐高压、承受电流大等特点。

2) 应用

它广泛应用在交流调速、变频器、开关电源、照明、牵引、电力传动等领域中。

5.6.2 工作原理

1. 基本概念

1) 导通	由图 5-43 可知，当在 IGBT 的门极 G 和发射极 E 之间加上正向电压时，可产生 IGBT 内部的 PNP 型晶体管的基极电流，从而使 IGBT 导通。
2) 导通压降	IGBT 导通后，电导调制效应使通态电阻减小，通态压降也随之减小。
3) 关断	在门极 G 和发射极 E 之间施加反向电压或不加信号时，MOSFET 内的沟道消失，PNP 型晶体管的基极电流消失，IGBT 关断。
4) 反向阻断	当集电极被施加一个反向电压时，门极和集电极间就会承受反向偏压，耗尽层则会向 N-区扩展，使 IGBT 处于反向阻断状态。
5) 正向阻断	当门极和发射极短接并在集电极端子施加一个正电压时，IGBT 则处于正向阻断状态。
6) 闩锁	<p>由于 IGBT 在集电极与发射极之间有一个寄生 PNP 晶闸管。在特殊条件下，这种寄生器件会导通。这种现象会使集电极与发射极之间的电流量增加，甚至还会导致器件的击穿。晶闸管的这种导通现象被称为 IGBT 闩锁。</p> <p>通常情况下，当晶闸管全部导通时，静态闩锁出现。只在关断时才会出现动态闩锁。</p> <p>闩锁电流对 PNP 和 NPN 器件的电流增益有一定的影响，且与结温的关系非常密切。通常情况下 IGBT 的集电极最大电流与闩锁电流之间的比值约为 1:5。</p>

2. 性能特点

1) 电压控制型器件	IGBT 是电压控制型器件。在它的门极 G 与发射极 E 间施加十几伏的直流电压，只有微安级的漏电流流过，基本上不消耗功率。如果 IGBT 门极与发射极之间的电压过低，IGBT 不能正常地工作；如果电压超过门极与发射极之间的耐压，则 IGBT 可能被击穿而永久性损坏。
2) 三种情况导致损坏	(1) 加在 IGBT 集电极与发射极间的电压若超过集电极-发射极间的耐压，会永久损坏。 (2) 流过 IGBT 集电极-发射极的电流超过集电极-发射极允许的最大电流时，可能导致损坏。 (3) IGBT 的结温超过其结温的允许值，IGBT 可能会永久性损坏。
3) 输入阻抗与通态压降	IGBT 的输入阻抗很高，而通态压降较 VDMOSFET 器件要低，特别是在电流较大的情况下更明显。
4) 热稳定性好	温度在允许范围内变化时，器件主要参数变化很小，一般可以忽略不计。
5) 安全工作区	器件在大电流、高电压的开关状态下工作时，由于电流的不均匀分布导致超出安全工作极限时，经常引起器件损坏。电流分布与电流上升率 (di/dt) 有关。所以安全工作区经常被分为正向安全工作区和反向安全工作区。在同等条件下，安全工作区比较大，且有更强的耐电脉冲冲击能力。
6) 击穿电压和饱和电流	部分 IGBT 的集电-发射极间的击穿电压可超过 1200V；集电极的最大饱和电流可超过 1500A。
7) 开关能力	IGBT 的开关速度高，开关损耗小。在电压 1000V 以上时，开关损耗只有 GTR 的 1/10，与电力 MOSFET 相当。同 MOSFET 和 GTR 相比，IGBT 的耐压和通流能力还可以进一步提高，同时还能保持开关频率高的特点。
8) 短路电流需管控	IGBT 管的短路电流可达额定电流的 10 倍以上，其值由 IGBT 管的门极电压和跨导来决定。只有正确地管控 IGBT 管的短路电流才能保证它的可靠工作。
9) 感性负载的威胁	IGBT 管应用电路接感性负载时，若 IGBT 管关断，加在其上的电压将瞬时由几伏上升到电源电压，产生很大的电压上升率 (dU/dt)，这将严重威胁 IGBT 管工作的可靠性。

5.6.3 主要参数和特性

1. 技术参数

1) 集电极-发射极最大电压 (U_{CES})	集电极-发射极最大电压是指门极-发射极间短路时加在集电极-发射极间的最大电压。相关参量还有门极-发射极开路时的最大集电-发射极间直流电压 U_{CEO} 、门极-发射极加反偏压时的最大集电极-发射极的直流电压 U_{CEX} 。
2) 最大门极-发射极电压 (U_{GES})	最大门极-发射极电压是指在集电极-发射极短路时的门极-发射极间的最大电压。该电压由门极氧化膜厚度和特性所决定。门极-发射极的击穿电压一般为 80V 上下，为保证安全，门极-发射极电压通常限制在 20V 以下。
3) 开启电压 ($U_{GE(th)}$)	开启电压是指 IGBT 能实现电导调制而导通的最低门极-发射极电压。 $U_{GE(th)}$ 随温度升高而略有下降。在环境温度为 25℃ 时， $U_{GE(th)}$ 的值一般为 2.6V 左右
4) 集电极电流 (I_C)	在保证 IGBT 长期正常工作的条件下，集电极允许流过的最大直流电流。

5) 耗散功率 (P_C)	保证单个 IGBT 长期稳定、正常工作, 集电极所允许耗散的功率。
6) 关断电流 (I_{CES})	当门极-发射极短路时, 在集电-发射极间加上规定电压后, 集电极流过的最小电流。
7) 最大漏电流 (I_{GES})	在集电极-发射极短路情况下, 门极-集电极间加上规定电压时的门极最大漏电流。
8) 饱和压降 ($U_{CE(sat)}$)	饱和压降是指在规定的集电极电流和门极电压的情况下, 集电极-发射极间的电压降, 它随门极电压的增加而降低。IGBT 导通时的饱和压降比 MOSFET 低而和 GTR 接近。
9) 输入电容 (C_{iss})	当集电极-发射极处于交流短路状态时, 在门极-发射极间及集电极-发射极间加上规定电压时, 门极-发射极间的电容。
10) 最大集电极 功耗 P_{CM}	在正常工作温度下工作时, IGBT 不损坏情况下的集电极所允许耗散的最大功率。

2. 器件参数

IGBT 器件有标准、高速和超高速系列。

器件的主要参数 U_{CE} 分别为 1.3V、1.5V 和 1.9V; U_{CES} 分别为 600V、800V、900V、1000V、1200V 等。

3. 工作特性

IGBT 的工作特性分为静态特性和动态特性。

1) 静态特性 IGBT 的静态特性主要有伏安特性、转移特性和开关特性。	(1) 伏安特性: 伏安特性是指以门极-发射极电压 U_{GE} 为参变量时, 集电极电流与门极电压之间的关系曲线。输出的集电极电流受门极-发射极电压 U_{GE} 的控制, U_{GE} 越高, I_d 越大。其伏安特性可分为饱和区、放大区和击穿区三部分。
	(2) 转移特性: 转移特性是指集电极电流 I_C 与门极-发射极电压 U_{ge} 间的关系曲线。当门极-发射极电压小于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时, I_{GBT} 处于关断状态。 在 IGBT 导通后, I_d 与 U_{GE} 基本呈线性关系。最高门极-发射极电压受最大集电极电流限制, 其最佳值一般为 15V 左右。
	(3) 开关特性: 开关特性是指集电极电流与集电极-发射极电压之间的关系。IGBT 处于导通态时, 由于它的 PNP 晶体管为宽基区晶体管, 所以其放大系数 β 值极低, 通态压降很小。例如, 耐压 1000V 的 IGBT 的通态压降为 2~3V。IGBT 处于断态时, 只有很小的泄漏电流存在。IGBT 的开关速度低于 MOSFET 而高于 GTR。
2) 动态特性	(1) IGBT 的开通: 开通要经历时间延迟和电流上升两个阶段。开通时间 t_{on} 是指开通延迟时间与电流上升时间之和; 开通延迟时间 $t_{d(on)}$ 是指从 U_{GE} 上升至其幅值 10% 的时刻起到 I_C 升至 10% I_{CM} 为止所需要的时间。上升时间 t_r 是指 I_C 从 10% I_{CM} 上升至 90% I_{CM} 所需的时间。
	(2) IGBT 的关断: 关断也要经历关断延迟和电流下降两个阶段。关断延迟时间 $t_{d(off)}$ 是指从 U_{GE} 后沿下降到其幅值 90% 的时刻起, 到 I_C 下降至 90% I_{CM} 所需要的时间; 电流下降时间是指 I_C 从 90% I_{CM} 下降至 10% I_{CM} 所需的时间。关断时间 t_{off} 就是关断延迟时间与电流下降时间的和。关断时间随门极和发射极并联电阻值的增加而增加。

5.6.4 驱动原理及应用

1. 驱动原理

IGBT 的驱动原理与电力 MOSFET 基本相同，由门极-发射极电压 U_{GE} 决定的。

<p>(1) 开通条件：IGBT 的开通条件是要给其门极和发射极之间加上正向电压。IGBT 门极-发射极的导通是通过加正向门极电压形成沟道、给 PNP 晶体管提供基极电流来实现的。IGBT 的开启电压一般为 3~4V。</p>
<p>(2) 关断条件：IGBT 的关断条件是要给其门极和发射极之间加上反向电压。由于 IGBT 的输入电容较 MOSFET 为大，所以关断 IGBT 的反偏压应该高于许多 MOSFET 驱动电路提供的偏压。给门极加反向电压能消除沟道，阻断流过反向门极的电流而使 IGBT 关断。</p>

2. 产品类型

IGBT 用途广，产品多，类型也多，大致分以下几类。

<p>(1) 小功率 IGBT：小功率 IGBT 应用范围一般都在 600V、1kA、1kHz 以下领域，主要用于微波炉、洗衣机、电磁炉、整流器、照相机等家电产品，也可用在电源、电机、输配电等中、大功率领域。</p>
<p>(2) V-IGBT：V（沟槽结构）的 IGBT 是在管芯上刻槽，芯片元内部形成沟槽式门极的一类产品，尺寸小，沟道电阻也小，电流密度较大。V-IGBT 产品主要适用于低电压驱动，可表面贴装。</p>
<p>(3) NPT-IGBT：NPT（非传统型）的 IGBT 是采用薄硅片技术，以离子注入发射区代替厚层高阻外延制成的产品，具有成本低、速度高、损耗小、正温度系数、无锁定效应等特点。电压在 600~1200V 的 IGBT 产品中，NPT-IGBT 可靠性最高。现已有 6500V 高压的 NPT-IGBT 问世。</p>
<p>(4) SDB-IGBT：SDB-IGBT 是采用 SDB（硅片直接键合）技术制造的高速 IGBT 模块系列产品，具有高速、低饱和压降、正温度系数、易于并联等特点。</p>
<p>(5) 超快速 IGBT：超快速 IGBT 的关断时间不超过 2000ns，采用特殊高能照射分层技术，关断时间可控制在 100ns 以下。主要用于大功率电源变换器等。</p>

3. IGBT 模块

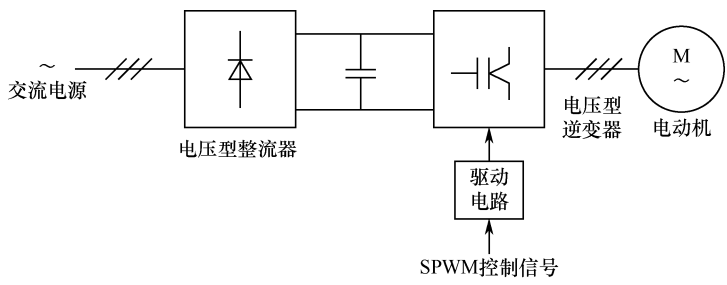
IGBT 模块是将功率器件、控制电路、驱动电路、接口电路、保护电路、连线等按照优化电路拓扑与系统结构、形成部分或完整功能、可组合和更换的标准单元部件。

<p>(1) 单管模块：将 IGBT 与 FRD（快速恢复二极管）有效结合，减少转换状态损耗而制成的模块产品。主要用于电机驱动和功率转换装置。</p>
<p>(2) 半桥模块（也称二单元模块）：这是一个桥臂的两只半桥 IGBT 模块，可组成全桥（H 桥）逆变电路。</p>
<p>(3) 智能功率模块（即 IPM 模块）：IPM 是将两个或两个以上的功率半导体芯片（如各类晶闸管、整流二极管、功率复合晶体管、功率 MOSFET、绝缘栅双极型晶体管等），按一定电路互连、制成包含功率器件、驱动、过压与过流保护、控制电路等多个芯片连接、并封装在同一绝缘外壳内、具有部分或完整功能、相对独立的功率模块。</p> <p>智能功率模块主要应用于电机、电气、保护及电源转换等领域。</p>

<p>(4) ITPM 模块：是将晶闸管主电路、移相触发系统及保护电路共同封装在一个塑料外壳内构成的智能晶闸管模块。它在整流、逆变、变频等领域广为应用。</p>
<p>(5) 功率电子 PEBB：PEBB 是一种针对分布式电源系列进行划分和构造的新的模块化理念，在系统层面对电路合理细化，抽取出具有相同功能或相似特征的部分，制成通用模块 PEBB，作为功率电子系统的基础部件。</p> <p>PEBB 采用多层叠装三维立体封装与表面贴装技术，所有待封装器件均以芯片形式进入模块，模块在系统架构下，将散热器、整流桥、驱动电路、传感器、信号调节电路等集成为一体。PEBB 的应用方便、灵活，可靠性高，可维护性好。</p>
<p>(6) 集成功率电子模块 IPEM：模块内部通用的主电路、控制、驱动、保护、电源等电路及无源元件，通过多层互连和高集成度混合 IC 封装，形成通用性标准化的 IPEM 模块。</p> <p>IPEM 模块不采用焊丝互连，增加了可靠性，降低了电路接线电感，提高了系统效率，可以构成各种不同的应用系统。</p>
<p>(7) iPOWIR：iPOWIR 是一种多芯片模块。它将功率器件、控制及脉宽调制用 IC 和无源元件采用球阵列 BGA 封装技术，组装在同一外壳中而成。</p> <p>iPOWIR 能简化电源设计、减少外围元件、压缩电路板面积，以低成本制造功能齐备的电源产品。</p>
<p>(8) 专用模块：IGBT 专用模块有用于制动系统的 MDx 系列；具有短路保护功能，适用于直流无刷电机驱动器和逆变器驱动器的 K 系列；适用于空调设备的 F 系列；适用于不需要短路保护的 UPS、电源和马达驱动器的 U 系列；适用于具有功率因数补偿功能电源的 U 系列；还有内为斩波器电路结构的斩波器模块、高速开关模块、低饱和电压模块；等等。</p>

4. IGBT 在变频调速中的应用

IGBT 适用交流电机控制、变频器、开关电源、牵引传动等，在各种工控及电力变换中获得广泛的应用。图 5-44 所示为在变频调速器中的应用。

<p>1) 变频调速系统原理框图（见图 5-44）</p>  <p>图 5-44 变频调速系统原理框图</p>
<p>2) 工作原理</p> <p>正弦脉宽调制（缩写 SPWM）变频调速系统的原理框图如图 5-44 所示。主回路为以 IGBT 为开关元件的电压源型 SPWM 逆变器的标准拓扑电路。电容由整流电路进行充电，控制回路产生的 SPWM 信号经驱动电路控制 IGBT 的通断，进而控制逆变器的输出波形；变频器向异步电动机输出相应频率、幅值和相序的三相交流电压，控制三相电动机按一定的转速和转向运转。</p>

第 6 章 光电器件

光电器件是指能够实现光-电、电-光转换的半导体器件。它们有光电二极管、光电三极管、光电耦合器、发光二极管、光电开关等多种，广泛应用在家用电器、太阳能发电、工业控制、检测探测、医疗器械和安全系统等各个领域。

6.1 光电二极管

光电二极管（也称光敏二极管）是将光信号转变成电信号的二极管。通常它工作在反向偏置状态。光电二极管内含一个 PN 结，具有单方向导电特性，在管壳上有一个能射入光线的窗口，窗口上镶着玻璃透镜，光线可通过透镜直接照射到管芯上。

6.1.1 基本知识

1. 符号

1) 文字符号

光电二极管的文字符号为 VD。

2) 图形符号

光电二极管的图形符号如图 6-1 所示。

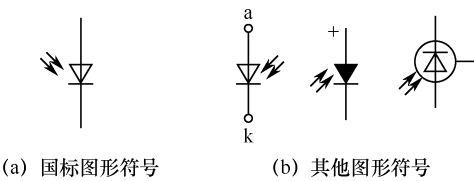


图 6-1 光电二极管的图形符号

2. 外部形状

光电二极管的封装材料及外部形状有多种，常见的如图 6-2 所示。

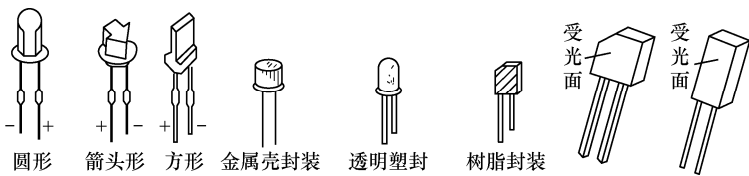


图 6-2 常见光电器件封装材料及外部形状

3. 常见光电二极管

国产光电二极管有 2AU、2CU 和 2DU 等系列，主要用于光电开关、照度计、色彩传感

器、图像传感器、光度计、曝光计等。常见光电二极管如图 6-3 所示。



图 6-3 常见光电二极管

4. 结构

光电二极管的结构通常由管芯、管壳、管座、引脚等构成，如图 6-4 所示。

光电二极管 PN 结面积较大，电极面积小，厚度一般小于 $1\mu\text{m}$ 。常见的传统太阳能电池就是通过大面积的光电二极管来产生电能的。

结构特点：（1）管芯的 PN 结（或 PIN 结）对光很敏感，有比较高的光电转换效率。（2）管壳上有玻璃透镜（即光窗），方便入射光直接照射到 PN 结（或 PIN 结）区，但窗口形状多样。（3）PN 结（或 PIN 结）面积较大，以便尽量多地接收入射光，提高光能的转换效率。（4）电极小而紧凑。

5. 主要特性

- （1）光电二极管是在反向电压作用下工作的。
- （2）光电二极管对光的变化非常敏感，可利用控制光照强弱来改变管中转换的能量大小。
- （3）光电二极管同普通二极管一样，具有单向导电性。
- （4）当入射光的强度一定时，外加反向偏压的光电二极管相当于一个恒流源。
- （5）有光照无外加电压时，光电二极管相当于一个光电池，P 区为正极，N 区为负极。

6. 带螺纹封装的光电二极管

光电二极管有的采用带螺纹封装（见图 6-5），外壳接地，主要是为安装方便。封装带有标准 SMA 接头或 BNC 接头，可以方便地将电信号输出到外电路。

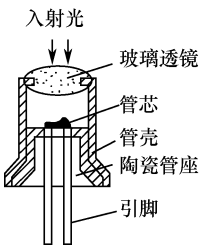


图 6-4 光电二极管的结构



图 6-5 带螺纹封装的光电二极管

带螺纹封装光电二极管的管壳接地，内部接线有 A 型（阴极接地）和 B 型（阳极接地）两种，如图 6-6 所示。

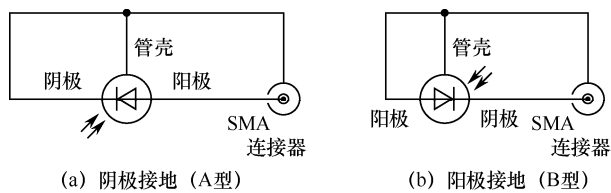


图 6-6 带螺纹封装的光电二极管的内部连接

7. 种类

光电二极管通常有 PN 结型、PIN 结型、雪崩型和肖特基型等类型。

(1) PN 结型。PN 结型光电二极管的优点是暗电流小、耐振动、耐冲击等。缺点是响应速度较慢，输出电流较小。

(2) PIN 型。PIN 型光电二极管的优点是结电容小，响应速度快；缺点是暗电流大。主要用于高速光的检测、光通信、光纤、遥控等。

(3) 肖特基型。肖特基型（又称发射键型）光电二极管是用铝等金属薄膜代替 P 型半导体与 N 型半导体构成的，是一种金属-半导体器件。肖特基光电二极管的主要特点是响应速度非常快，可检测微紫外线、弱光和短波光。主要用在高速光通信、光检测等领域。

(4) 雪崩型。雪崩型光电二极管（又称固态光电倍增管、崩溃光电二极管，缩写为 APD）的基本结构是采用易产生雪崩倍增效应的二极管结构，是一种将产生的光电流放大后输出的二极管。

8. 光电二极管阵列

一个由上千只管芯组成的一维管组，可以用来构成位置传感器、角度传感器等。

1) 光电二极管组

光电二极管组是将两只以上管芯封装在一个管壳而成。在外壳上，每只光电二极管都有玻璃受光窗口。

光电二极管组（如 2CU401）的外形和内部电路如图 6-7 所示。图中，引线“COM”、“(N)”端为各自的公共阴极。

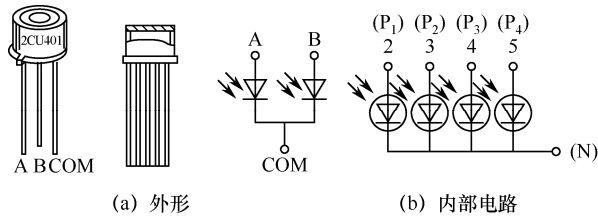


图 6-7 光电二极管组的外形与内部电路

2) 光电二极管阵列

光电二极管阵列具有体积小、成本低等特点。太阳能电池组管芯多为方阵或长方形阵。

光电二极管阵列（又称光电二极管列阵或光电二极管矩阵）的底座一般由陶瓷制成，光电二极管阵列的管芯组通常是直线排列的对光敏感 PN 结，透光窗口用玻璃作盖板。阵列工作时，入射光透过玻璃盖板直接照射到阵列管芯组的光敏面，实现光电转换。

光电二极管阵列的标准像素尺寸有 1.5mm、1.6mm、2.5mm 等，可带或不带闪烁体及 X 射线过滤装置，具有探测低能射线的窗口。

6.1.2 工作原理与工作模式

1. 工作原理 光电二极管 的工作原理是 基于光电效应。	<p>(1) 光电效应是指光照射到某些物质上而引起物质电性能发生变化的光致电效应。这种效应主要有外光电效应和内光电效应两种。</p>
	<p>(2) 外光电效应是指在光照的作用下,物体内的电子逸出物体表面向外发射的现象;内光电效应是指当光照射在物体上时,物体的电导率会发生变化,或产生光生电动势的现象。</p>
	<p>(3) 光电效应又可分为光电导效应(即光导效应、外光电效应)和光生伏特效应(即光伏效应、内光电效应)两种类型。</p>
	<p>(4) 光电二极管能在反向电压下工作。没有光照时,反向电流(称为暗电流)极其微弱,一般小于 $0.1\mu\text{A}$;有光照时,反向电流(称为光电流)迅速增大到几十微安,入射光的强度越大,生成的反向电流也越大。</p>
	<p>(5) 光电二极管的光电流随入射光强度的变化而变化,控制入射光的强弱就能调节光电流的大小。</p>
	<p>(6) 在外电路接上负载,光电流就会流过负载、产生电压降,从而实现了光信号到电信号的转换。负载电阻小,转换输出的电压就低。</p>
	<p>(7) 许多光电二极管为 PIN 结型,以增加二极管对光信号的响应速度。</p>
2. 工作模式 光电二极管 有两种工作模 式,一种是光伏 模式(零偏置电 压),另一种是 光导模式(反 偏置电压),如 图 6-8 所示。图 中, $-U_{\text{BIAS}}$ 为负 的电源电压。	<p>1) 光伏(也称光电压)工作模式</p> <p>当偏置电压为零伏时,光电二极管工作在光伏模式,如图 6-8(a)所示。在这种模式下,光电二极管内几乎无暗电流流过;在光照下,两端电势差逐渐积累到一定数值,对外表现为一个电压源。</p> <p>在这种模式下,光电二极管的光电流和入射光的强度呈线性关系,热噪声很小。这种工作模式利用了光伏效应,是太阳能电池的理论基础。</p> <div></div> <p>(a) 光伏工作模式</p>
	<p>2) 光导(也称光电导)工作模式</p> <p>当偏置电压为负(即反向偏压)时,光电二极管工作于光导模式,具体电路如图 6-8(b)所示。这种工作模式大大提高了光电二极管的响应速度,但噪声较大。</p> <p>在光导模式下,即使无光照,光电二极管内也有一个很小的电流(即暗电流或无照电流)流过,产生噪声而成为附加的噪声源;有光照时很容易产生大的暗电流,但可以选择光电二极管的材料以限制其大小。</p> <p>在这种模式下工作的光电管中有暗电流流过;管子的输出电流(即光电流)与入射光的功率成正比。</p> <p>这种工作模式利用了光导效应,是各类光电探测器的理论基础。</p> <div></div> <p>(b) 光导工作模式</p>

图 6-8 光电二极管的工作模式

6.1.3 光电二极管特性

1. 光照特性

当光电二极管两端加反向电压值固定时，光电二极管中的光电流与入射光的照度强弱呈线性关系，即光电流的大小随照度变化而线性变化，入射光的照度越强，输出的光电流就越大。光照特性曲线如图 6-9 所示。

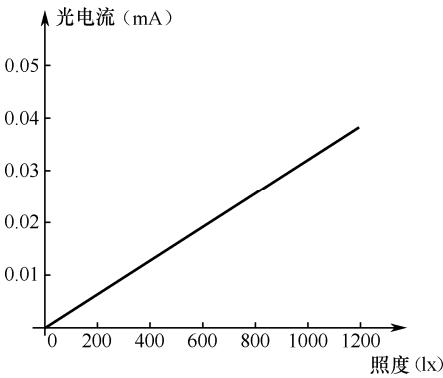


图 6-9 光照特性曲线

光照特性曲线的斜率称为光电二极管的灵敏度。灵敏度的典型值通常为 0.1mA/lx 。

2. 伏安特性

<p>1) 加反偏压</p> <p>光电二极管在加反向偏置电压（即光导工作模式）下工作时：暗电流很小；有光照时的光电流（即反向电流）显著增大；照度越强，光电流也越大，两者呈线性关系。特性如第三象限曲线所示。</p>	<p>光电二极管的伏安特性是指光电二极管所产生的光电流与其两端所加电压之间的关系。其伏安特性曲线如图 6-10 所示。图中，E 表示入射光的照度，lx 为照度单位“勒克斯”的英文缩写。</p> <p>VD—光电二极管 EC—电源电压 RL—负载电阻</p> <p>$R_1 > R_2$</p> <p>反向电压 E</p> <p>照度增大</p> <p>(无光照时) I_1</p> <p>(光照下) 1</p> <p>(光照下) 2</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>正偏压</p> <p>零偏压</p> <p>反偏压</p> <p>反向电流</p> <p>负偏压</p> <p>EC</p> <p>RL</p> <p>VD</p>
<p>2) 加零偏压</p> <p>在零偏压（即光伏工作模式）下，光电二极管犹如一个恒流源，电流的大小与照度的强度成正比。与外电路不连接时，表现为一个电压源；当接通负载后，形成一个电路，电路中的电流由恒流源供给，所以负载电阻的阻值越小，电阻上的电压降也越小。负载电阻不变时，光照越强，电流越大，负载电阻的压降也越大。特性如第四象限曲线所示。</p>	
<p>3) 加正偏压</p> <p>光电二极管两端加正向电压（即正偏压）时，其伏安特性与普通二极管相似。特性如第一象限的曲线所示。</p>	

图 6-10 伏安特性曲线

3. 响应特性

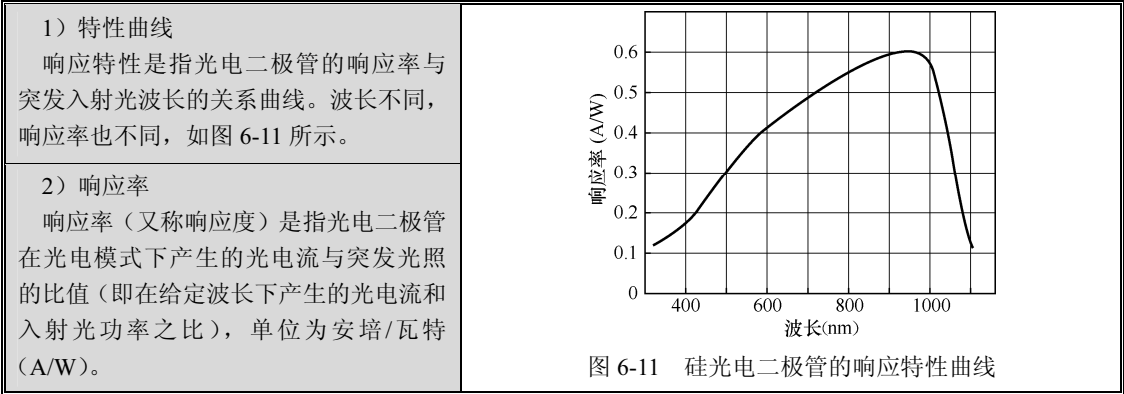


图 6-11 硅光电二极管的响应特性曲线

4. 光谱特性

1) 光谱特性	光电二极管产生的光电流与入射光波长之间的关系叫光谱特性。光子能量的大小与光的波长有关: 波长越长, 光子具有的能量越小; 反之, 波长越短, 光子具有的能量越大。
2) 光谱灵敏度	(1) 入射光的吸收: 硅光电二极管对波长大于 1100nm 的光照几乎不产生电流, 即硅光电二极管不吸收波长大于 1100nm 的入射光。 (2) 灵敏度: 灵敏度是反映光电二极管对入射光的敏感程度, 其数值为每微瓦 (μW) 入射光能量所产生的光电流大小, 单位为 $\mu\text{A}/\mu\text{W}$, 该电流值越大, 灵敏度越高。
3) 光谱波长范围	光谱波长范围是指光电二极管对不同波长光的响应范围, 它是光谱响应曲线上不小于最大幅度 10% 的曲线段所对应的波长范围。

6.1.4 主要技术参数

1) 最高反向工作电压 (U_{RM})	最高反向工作电压是指光电二极管在无光照的条件下,反向漏电流不大于 $0.1\mu\text{A}$ 时所能承受的最高反向电压值。一般光电二极管的 U_{RM} 为 $10\sim 50\text{V}$ 。																										
2) 暗电流 暗电流 (也称无光照电流) 是指光电二极管在光电模式 (加反向工作电压) 下、无光照时管中流过的电流。暗电流包括辐射电流和 PN 结的饱和电流。 光电二极管的制造材料和受光区尺寸大小会影响其暗电流和有关参数,表 6-1 给出了几种光电二极管制造材料及其相关的暗电流、速度和灵敏度。	<p>暗电流与环境温度与反偏压直接相关,温度每增加 10°C,暗电流几乎增加一倍;反偏置电压越高,暗电流越大;硅管通常比锗管的暗电流小。暗电流越小,管子性能越稳定,对光的敏感度越高。</p> <p>表 6-1 不同材料的光电二极管主要性能对比表</p> <table><tr><th>材料</th><th>暗电流</th><th>速度</th><th>灵敏度</th></tr><tr><td>硅 (Si)</td><td>小</td><td>高</td><td>400~1000nm</td></tr><tr><td>锗 (Ge)</td><td>大</td><td>低</td><td>900~1600nm</td></tr><tr><td>磷化镓 (GaP)</td><td>小</td><td>高</td><td>150~550nm</td></tr><tr><td>砷化镓 (InGaAs)</td><td>小</td><td>高</td><td>800~1800nm</td></tr><tr><td>外延型砷化镓化物 (InGaAs)</td><td>大</td><td>高</td><td>1200~2600nm</td></tr></table>			材料	暗电流	速度	灵敏度	硅 (Si)	小	高	400~1000nm	锗 (Ge)	大	低	900~1600nm	磷化镓 (GaP)	小	高	150~550nm	砷化镓 (InGaAs)	小	高	800~1800nm	外延型砷化镓化物 (InGaAs)	大	高	1200~2600nm
材料	暗电流	速度	灵敏度																								
硅 (Si)	小	高	400~1000nm																								
锗 (Ge)	大	低	900~1600nm																								
磷化镓 (GaP)	小	高	150~550nm																								
砷化镓 (InGaAs)	小	高	800~1800nm																								
外延型砷化镓化物 (InGaAs)	大	高	1200~2600nm																								

3) 光电流 (I_c)	光电流是指光电二极管在加有正常反偏压、受到光线照射时的电流值。同样条件下光电流的值越大越好, 一般约为几十微安到十几毫安。
4) 响应时间 (T_r)	响应时间是指光电二极管将光信号转化为电信号所需要的时间, 一般小于几百微秒。时间的长短主要取决于结电容与外部电路电阻的乘积。响应时间越短, 光电二极管的工作频率越高。
5) 结电容 (C_j)	结电容是指光电二极管 PN 结 (或 PIN 结) 的电容, 是影响光电管的带宽和响应速度的主要因素。结面积越小, 结电容也越小, 工作频率就越高。在反向偏压作用下, 结电容减小, 响应速度加快。
6) 噪声等效功率	噪声等效功率 (又称等效噪声功率, 简称 NEP) 是指能够产生光电流所需的最小入射光功率, 是光电二极管最小可探测的输入功率。 在光通信系统中时, 这个参数直接决定了光接收器的灵敏度, 即获得指定比特误码率的最小输入功率。
7) 探测能力 (D)	探测能力等于等效噪声功率的倒数。它直接决定了光电二极管的灵敏度。
8) 正向压降 (U_F)	正向压降是指光电二极管中通过规定的正向电流时两端间产生的电压降。
9) 分流电阻	分流电阻是指零偏压下光电二极管的结电阻。理想光电二极管的分流电阻为无限大, 但实际值与使用的材料有关, 一般从十欧姆到数千兆欧不等。
10) 串联电阻	串联电阻是半导体材料的自身电阻, 通常可以忽略。串联电阻来自于光电二极管的触点和线接头, 通常用来确定二极管在零偏压下的线性度。

表 6-2 常用 2CU 系列光电二极管的主要参数

参数 型号	最高工作电压 $U_{GST}(V)$	暗电流 (μA)	光电流 (μA)	灵敏度 ($\mu A/\mu W$)	峰值响应波长 (μm)	响应时间 (s)		结电容 (pF)
						t_r	T_f	
2CU1A	10	≤ 0.2	≥ 30					
2CUIB~1E	20~50							
2CU2A	10	≤ 0.1	≥ 30	≥ 0.5	0.88	≤ 5	≤ 50	8
2CU2B~2E	20~50							
2CU5	12	≤ 0.1	≥ 5					
2CUL1		< 5		≥ 0.5	1.06	≤ 1	≤ 1	≤ 4

表 6-3 常见 VTT 系列光电二极管的主要参数


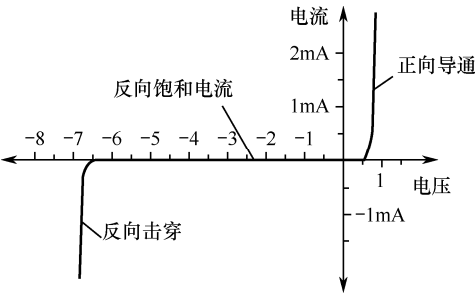
型号	光电流 (mW/cm^2) mA min CE=5V	暗电流 nA V_{CE} Max (V)	反偏压 (V) min	反偏压 (V) min	正向压降 (V) max	t_R/t_F μs
VTT1222W	0.9 100 (5)	10 20	50	6	0.25	2
VTT1223W	1.5 100 (5)	10 20	40	6	0.25	3
VTT1225	4 100 (5)	100 10	30	5	0.25	1.5
VTT1226	7.5 100 (5)	100 10	30	5	0.25	3
VTT1227	12 100 (5)	100 10	30	5	0.25	4
VTT3323LA	2 20 (1)	100 10	30	5	0.25	3
VTT3324LA	4 20 (1)	100 10	30	5	0.25	4
VTT3325LA	6 20 (1)	100 10	30	5	0.25	5
VTT3423LA	1 20 (1)	100 10	30	5	0.25	3
VTT3424LA	2 20 (1)	100 10	30	5	0.25	4
VTT3425LA	3 20 (1)	100 10	30	5	0.25	5
VTT7122	1 100 (5)	100 10	30	5	0.25	2

11) 常见光电二极管的技术参数
常见光电二极管的技术参数值见表 6-2 和表 6-3。

6.1.5 常用光电二极管

1. 雪崩光电二极管

雪崩光电二极管（又称固态光电倍增管，简称 APD）是一种 PN 结型的、具有内部增益的、利用半导体的“雪崩效应”制成的光电二极管。

<p>1) 常见雪崩光电管(见图 6-12)</p>	<p>常见雪崩光电二极管产品系列有 IAE、SAE 和 SAR 等。</p> <div data-bbox="418 462 945 576"></div> <p>图 6-12 雪崩光电二极管</p>
<p>2) 结构</p>	<p>雪崩光电二极管是一种 PN 结型的光检测器。它利用载流子的雪崩倍增效应来放大光电流以提高检测的灵敏度。其基本结构是采用易产生雪崩倍增效应的二极管结构。</p>
<p>3)工作原理</p>	<p>(1) 雪崩效应：在强电场作用下，低掺杂半导体中的载流子获得的能量增大，不断加快并增强与晶体原子的碰撞，使自由电子-空穴对增加；新产生的载流子又通过碰撞产生更多的自由电子-空穴对，这就是倍增效应。即一生二，二生四，如此等等，载流子像雪崩一样增加，这种现象就是雪崩效应。</p> <p>(2) 雪崩击穿：当加在 PN 结上的反向电压增大到一定数值时，载流子倍增，就像雪崩一样，这时雪崩光电二极管被击穿，输出电流迅速增大。其变化曲线如图 6-13 所示。</p> <div data-bbox="446 1024 918 1319"></div> <p>图 6-13 雪崩击穿示意图</p> <p>(3) 倍增系数：合理调节雪崩光电二极管的反向偏压可以得到较大的倍增系数。工作时的反向偏置电压（硅雪崩二极管）一般为 100~200V，获得约百倍的电流增益，使其达到雪崩击穿状态。有的 APD 可以加高于 1500V 的电压而不致击穿，可获取千倍以上的电流增益。</p> <p>因为电流增益受反向偏置电压的影响很大，所以实用时要对反向偏置电压进行准确控制，以保持增益的稳定。</p> <p>(4) 光电流与反向偏压的关系：从图 6-13 不难看出，当施加的反向偏压较低时，不产生雪崩过程，也没有倍增效应，电流很小；但当工作偏压增高到一定值时，输出的电流按指数规律增加；施加的反向电压继续升高，电流就急速增大。</p>

3)工作原理	<p>(5) 脉冲信号：当入射光脉冲信号且无偏压时，雪崩光电二极管产生的光电流脉冲信号很小。当施加的反向偏压升到足够高时，光电流便产生雪崩倍增效应，输出的光电流脉冲信号迅速增大。</p> <p>(6) 当施加的反向偏压接近雪崩击穿电压时，雪崩电流维持自身流动，使暗电流迅速增加，但雪崩放大效率却减小，光电流灵敏度也随反向偏压的增加而减小。</p> <p>(7) 最佳工作点：雪崩光电二极管的最佳工作点是在接近雪崩击穿点附近。有时为了降低暗电流，会把工作点向左移动一些，虽然灵敏度有所降低，但是暗电流和噪声特性有所改善。</p> <p>(8) 在最佳工作点附近，光电流随反向偏压变化而变化显著，反向偏压有较小变化，光电流就变化很大。</p> <p>(9) 在雪崩过程中 PN 结上的反向偏压容易产生波动，影响增益的稳定性。所以在确定工作点后，对偏压的稳定性要求很高。</p>
4) 特点与应用	<p>(1) 特点：雪崩二极管具有体积小、功率大、灵敏度高、响应快、效率高等特点，但是噪声较大。</p> <p>(2) 应用：这种器件在安检设备、荧光探测器、微弱光信号的探测和接收、光纤通信、激光测距、激光雷达、光纤数据传输和条形码扫描等系统中应用广泛。</p>

2. PIN 型光电二极管

PIN 型光电二极管（也称 PIN 结二极管、PIN 二极管）是在 PN 结的 P 区和 N 区间夹一层本征半导体构成的晶体二极管，这是一种特殊的电荷存储二极管。在 PIN 结中，因内建电场区（即 I 层）较宽，使得入射光几乎能完全被 I 层吸收并转变为光生载流子，所以 PIN 结二极管作为光电探测器使用时，可以获得较好的探测灵敏度，因而可以作为较高灵敏度的核辐射探测器。实际上 PIN 光电二极管是最通用的一种探测器。

硅 PIN 光电二极管的工作波长范围一般为 0.5~1.1μm。三种材料 PIN 光电二极管通用特性参数见表 6-4。

表 6-4 三种材料的 PIN 光电二极管通用特性参数

参数	符号	单位	Si	Ge	InGaAs
波长范围	λ	nm	400~1000	800~1650	1100~1700
响应度	R	A/W	0.4~0.6	0.4~0.5	0.75~0.95
暗电流	I_n	nA	1~10	50~500	0.5~2.0
上升时间	τ	ns	0.5~1.0	0.1~0.5	0.05~0.5
带宽	B	GHz	0.3~0.7	0.5~3.0	1.0~2.0

6.1.6 光电二极管的应用

1. 应用领域

- (1) 光电二极管在消费电子产品中广为应用，如 DVD、CD 播放器、烟雾探测器、红外线遥控器等。

(2) 光电二极管可以用于测量光，如相机的测光器、路灯亮度自动调节等。

- (3) 用来检测突发的光照，或者探测同一电路系统内部的发光。光电二极管常常和发光器件（通常是发光二极管）合并在一起组成一个器件，通常被称为光电耦合器。它在电子仪器仪表、电子控制装置与设备中广泛应用。
- (4) 光电开关。通过分析接收到光照的情况来分析、判断外部人或机械元件的运动情况。它主要用于保护、安保系统。
- (5) 光电二极管用于精确测量光强，主要用于仪器及设备中。
- (6) 在医疗应用设备中，光电二极管广泛地应用在医疗仪器与设备，如 X 射线计算机断层成像（即 CT）、脉搏探测器等。
- (7) 当光强足够大时，雪崩光电二极管会被选用，如天文学、光谱学、夜视仪、激光测距仪等产品。

2. 应用电路

1) 与晶体管组合应用电路

光电二极管和晶体管一起构成的典型集电极输出电路如图 6-14 (a) 所示；同时也可以构成典型的发射极输出电路，如图 6-14 (b) 所示。

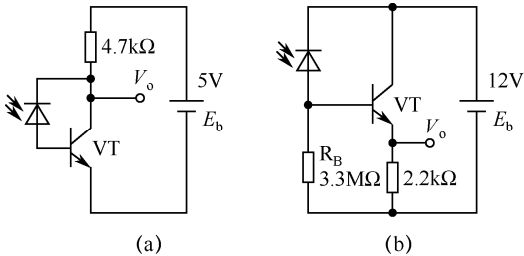


图 6-14 光电二极管与晶体管的组合应用电路

图中， E_b 为电源电压， V_o 为输出电压；光电二极管承受反偏压，工作在光电模式下。

集电极输出的信号与输入信号的相位相反，但输入信号数值被放大；发射极输出的信号与输入信号相位相同，适用于模拟信号电路；电阻 R_B 可以减小暗电流。

2) 与运算放大器的组合应用电路

光电二极管与运算放大器的组合应用电路如图 6-15 所示。图 6-15 (a) 为零偏置（即光伏）工作模式，图 6-15 (b) 为反向偏置（即光导）工作模式。

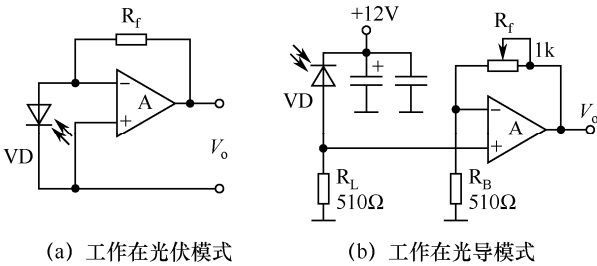


图 6-15 光电二极管与晶体管的组合应用电路

零偏置电路可以测量较宽范围的入射光，但响应速度稍慢，加反馈电阻 R_f 可调整输出电压。反向偏置电路的响应速度快，输出信号与输入信号同相位。

3) 构成定位检测电路

检测电路如图 6-16 所示。图中, R_f 是反馈电阻, 两个光电二极管都工作在光伏模式。

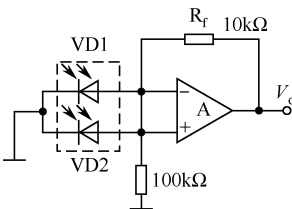


图 6-16 定位检测电路

定位传感器电路主要由阴极相连的两个光电二极管和运算放大器 A 等元件组成。来自光电管 VD1 与 VD2 的差动信号经放大后形成输出信号 V_o 。

4) 路灯光控电路

实用路灯光控电路如图 6-17 所示。图中 J 是继电器线圈; D 是续流二极管; 晶体管 VT1 构成射极跟随器; 光电二极管工作在光导模式下; 路灯通过继电器触点接市电 220V。

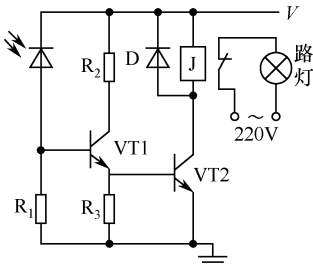


图 6-17 路灯光控电路

白天的光电二极管有光电流流过, 电源电压 V 几乎全部加在电阻 R_1 上, 晶体管 VT1 导通, VT2 也跟随导通, 继电器线圈 J 中有电流通过, 继电器动作, 动断触点断开, 路灯熄灭。

天黑后, 光电二极管中无电流通过, 电阻 R_1 上的压降近似为零, 晶体管 VT1、VT2 相继截止, 继电器线圈断电, 动断触点恢复闭合, 路灯被点亮。

5) 与运算放大器一起组成光探测器

光电二极管可以和跨阻抗运算放大器元件一起组成光探测器, 具体电路如图 6-18 所示。图中, A 为放大器反相输入端, B 为同相输入端, GND 为地, $-V$ 为负电源电压, BNC 为标准接头, R_L 为负载电阻。

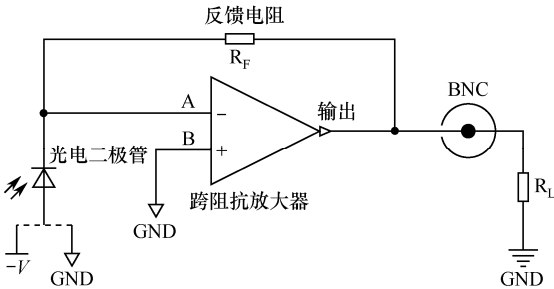


图 6-18 光探测器电路

光电二极管的输出接 A 端, 输出电流经跨阻抗放大器放大后输出到负载电阻 R_L , 这样就将光能转变为 R_L 的电压信号。由于光电二极管加的是反向偏压, 工作在光导模式, 其输出光电流与入射光强弱成正比, 所以 R_L 上电压也随入射光的强弱而发生变化, 根据 R_L 上电压的大小就可以判断光的强弱, 从而达到光检测的目的。电路中的放大器可以将小电流信号放大, 从而提高了检测的灵敏度, 实现弱光的检测。

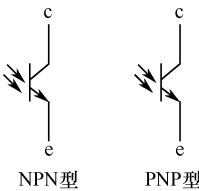
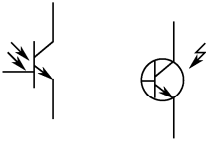
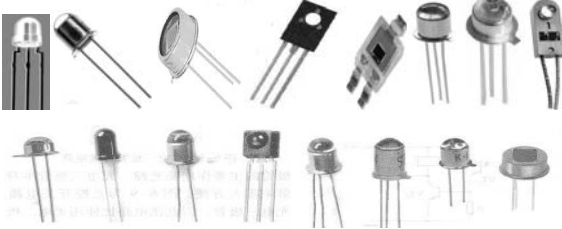
6.1.7 光电二极管的检测

1) 电阻测量法	(1) 遮住光电二极管的受光窗口，用万用表 $R\times 100$ 或 $R\times 1k$ 电阻挡测量光电二极管的正反向电阻值。正常光电管的正向电阻值为 $10\sim 20k\Omega$ ，反向电阻值为 $5M\Omega\sim \infty$ （无穷大）。 如果测得的正反向电阻值均很小或均为无穷大，说明光电二极管漏电或开路损坏。
	(2) 拿开受光窗口的遮盖物，再测量并观察其正反向电阻值的变化。正常光电管的正反向电阻值均应变小，阻值变化越大，说明光电二极管的灵敏度越高。
2) 电压测量法	将万用表置于量程为 $1V$ 直流电压挡，黑表笔接光电二极管的负极，红表笔接正极（光电管工作于光导模式），并将光电二极管的受光窗口对准光源。正常光电二极管的输出电压为 $0.2\sim 0.4V$ ，电压的大小与光照强度成正比。
3) 电流测量法	将万用表置于 $50\mu A$ 或 $500\mu A$ 电流挡，红表笔接正极，黑表笔接负极，受光窗口置于白炽灯光下，随着光照强度的增加，光电二极管的输出电流从几微安可以增大到几十至几百微安。

6.2 光电三极管

光电三极管（又称光敏三极管）是可以将接收的光信号转换成电信号并进行放大的晶体管，由两个 PN 结构成。它具有体积小、寿命长、无触点、抗干扰、电隔离、单向信号传输等功能。

6.2.1 光电三极管基本知识

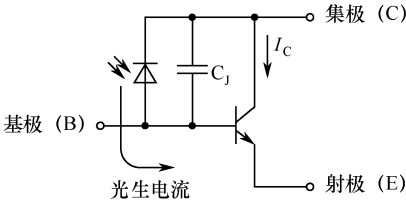
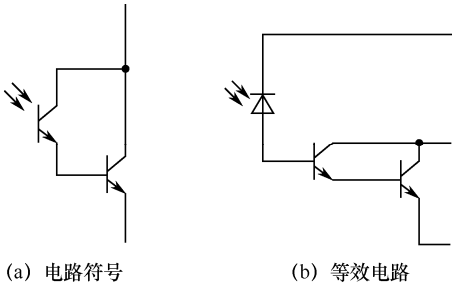
1) 符号	(1) 文字符号 光电三极管的文字符号是 VT，有的也用 V、Q 或 BG 表示。
	(2) 图形符号 光电三极管的图形符号如图 6-19 所示。 <div><div><p>NPN型 PNP型</p><p>(a) 国标图形符号</p></div><div><p>(b) 其他图形符号</p></div></div>
2) 常见光三极管 国产光电三极管主要有 3AU、3CU 和 3DU 系列，如图 6-20 所示。	 <p>图 6-20 光电三极管</p>

3) 结构	<p>光电三极管有 NPN 与 PNP 两种基本结构。用 N 型硅材料为衬底制作的为 NPN 结构，产品有 3DU 等系列；用 P 型硅材料为衬底制作的为 PNP 结构，产品有 3CU 等系列。</p> <p>光电三极管的集电结是对光敏感的 PN 结，所以集电结也称为受光结。</p> <p>光电三极管的管芯装在带有玻璃透镜的金属管壳内，当有光照射时，光线通过透镜集中照射在受光结上。</p> <p>光电三极管的结构如图 6-21 所示。</p>	
4) 分类	<p>(1) 按内部结构光电三极管通常分为 NPN 型和 PNP 型两大类。在有光照射时，NPN 型光电三极管的电流从集电极流向发射极，PNP 型光电三极管电流从发射极流向集电极，如图 6-22 所示。</p> <div></div> <p>(a) NPN 型 (b) PNP 型</p> <p>图 6-22 光电三极管的电流方向</p>	
5) 性能特点	(2) 按外观光电三极管可分为带透镜型和单纯附有窗口型两类。	
	(3) 按内部构造可分为普通晶体管型和达林顿管型。	
	(4) 按用途可以分为开关型和放大型。	
	(5) 按半导体材料可分为硅半导体、锗半导体和碳化硅等。	
	<p>(1) 光电三极管基极与集电极间的 PN 结为集电结（即受光结），在光照下产生的光生电流从基极流入三极管进行放大。光电三极管输出的光电流可达光生电流的 β（即光电三极管的放大系数）倍，输出电流一般为毫安级。</p> <p>(2) 光电三极管在较强的光照下，光电流与照度不呈线性关系，所以多用作光电开关元件或光电逻辑元件。</p> <p>(3) 光电三极管的基区（即受光结）面积较大，发射区面积较小，入射光直接照射在基区上。光照强度变化时，电极之间的电阻会随着变化。</p> <p>(4) 集电极电流受光照的控制，光照强，集电极电流也大。</p> <p>(5) 通常基极无引出线，只有集电极和发射极两个引脚，外形和光电二极管相似。但也有的光电三极管的基极引出用于温度补偿或附加控制等。</p> <p>(6) 正常工作时，集电结加反向偏置电压，发射结加正向偏置电压。</p>	

6.2.2 工作原理

光电三极管在工作时，电源电压加在集电极和发射极之间。基极-集电极 PN 结（即受光结）承受反向偏压。在这种状态下，入射光照射在受光结上，基极就有光生电流产生。该电

流被三极管放大后输出到外部电路。实际上光电三极管的工作原理可分为光生电流的产生和放大两个环节。

1)光电流的产生	光电三极管的光电转换是在受光结内进行的。光照激发产生的电子-空穴对在反向偏置的受光结内电场的作用下，电子流向集电区，被集电极收集；空穴流向基极区并与正向偏置的发射结发射的电子复合，形成基极电流（即光生电流），实现了光电转换功能。
2)光电流的放大	<p>当光照产生的基极电流（即光生电流）流进发射极时，在集电极回路中得到一个放大后的电流 I_C，如图 6-23 所示。图中，光电三极管具有电流放大作用，被放大的就是光生电流。</p> <p>当光电三极管加上工作电压后，管中的电流随着光照强度的改变而改变，光照强度越强，光电流也越大。</p> <p>光电三极管的集电极电流不仅受基极电流控制，也受光照的控制。</p> <p>光电三极管的发射极与外电路没有连接时，这时的光电三极管就变成了光电二极管。</p>
3) 等效电路 光电三极管的等效电路如图 6-23 所示。	 <p>图 6-23 光电三极管的等效电路</p>
4)光电达林顿管 光电达林顿管是由光电晶体管以达林顿管方式连接而成的组合管，具有较高的电流增益和较大的输出电流。光达林顿管的电路符号和等效电路如图 6-24 所示。	 <p>(a) 电路符号 (b) 等效电路</p> <p>图 6-24 光电达林顿管的电路符号及等效电路</p>
5)阻挡弱光的光电三极管	阻挡弱光的光电三极管是在普通光电三极管的基极和发射极间加一个分流电阻，只有当入射光强度超过门槛时，它才能转换成标准的光电三极管。该三极管既具有普通光电三极管的特性，又具有阻挡弱光的特性，适用于要求抑制环境光线干扰等场合。

6.2.3 特性曲线

光电三极管的基本特性主要有伏安特性、光电特性、温度特性、频率响应特性和光谱特性。

1. 伏安特性

光电三极管的伏安特性是指在给定光照度下，光电三极管上的电压与光电流的关系。

- (1) 无偏压。光电三极管在偏置电压为零（即无偏压）时，无论光照强度有多大，集电极电流都是零。
- (2) 加偏置电压。当光电三极管的发射结处于正向偏置、集电结处于反向偏置时，随着外加偏置电压的增高，伏安特性曲线趋于平坦，但向上偏斜，彼此间距增大，如图 6-25 (a) 所示。这是因为光电三极管除具有光电灵敏度外，还具有电流增益 β （即放大系数），并且 β 值随光电流的增大而增大。
- (3) 入射光的照度越强，光电流越大。
- (4) 光电三极管的共射极输出特性曲线如图 6-25 (b) 所示。图中，实线表示暗电流，虚线表示光电流。

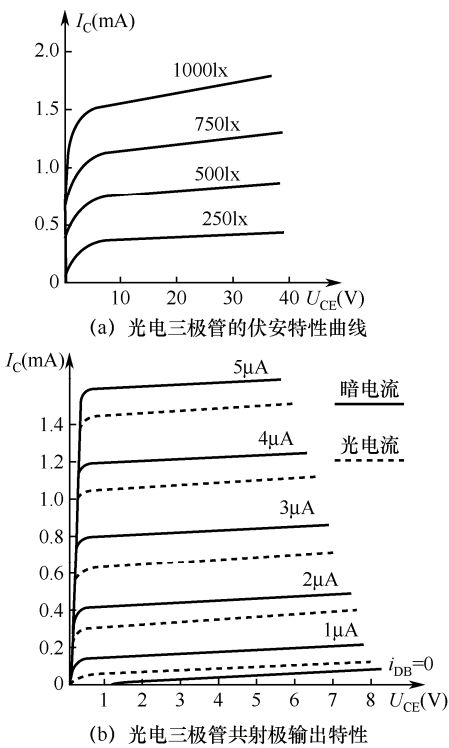


图 6-25 光电三极管的伏安特性曲线

2. 光电特性

光电特性是光电三极管的外加电压恒定时光电流与光照度之间的关系。其光电特性曲线的线性度不如光电二极管的好，在弱光照时光电流的增加较慢。光电三极管的光电特性曲线如图 6-26 所示。

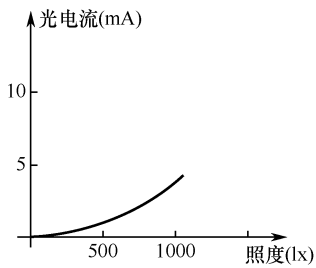


图 6-26 硅光电三极管的光电特性曲线

3. 温度特性

光电三极管的温度特性曲线如图 6-27 所示。不难看出，在一定温度范围内，光电三极管的光电流和温度成正比关系，温度越高，光电流越大。

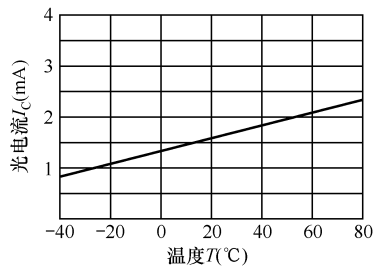


图 6-27 光电三极管的温度特性曲线

4. 光谱特性

硅光电三极管的光谱特性与光电二极管是相同的。它的波长响应范围为 $0.4\sim1.1\mu\text{m}$ ，峰值波长为 $0.85\mu\text{m}$ 。

6.2.4 主要参数

1. 技术参数

1) 暗电流 (I_D)	在无光照情况下、集电极与发射极间的电压为规定值时，流过集电极的反向漏电流称为光电三极管的暗电流，一般很小。
2) 光电流 (I_C)	在规定光照下、施加规定的工作电压时，流过光电三极管的电流称为光电流，光电流越大，说明光电三极管的灵敏度越高。
3) 集电极-发射极击穿电压 (U_{CEO})	在无光照情况下、集电极电流 I_C 为特定值时，集电极与发射极之间的电压降称为集电极-发射极击穿电压。
4) 最高工作电压 (U_{RM})	在无光照情况下、集电极电流 I_E 为规定的允许值时，集电极与发射极之间的电压称为最高工作电压。
5) 光电灵敏度	光电灵敏度是指给定波长入射光输入单位光功率时，光电三极管管芯单位面积输出的光电流的大小，同样条件下，光电流越大，灵敏度越高。
6) 最大功率 (P_M)	最大功率是指光电三极管在规定条件下所能承受的最大功率。
7) 峰值波长 (λ_p)	当光电三极管的光谱响应为最大时所对应的波长叫做峰值波长。
8) 响应时间	响应时间是指光电三极管对入射光信号的反应速度，一般为 $10^{-3}\sim10^{-7}\text{s}$ 。

2. 部分器件参数

国产光电三极管（见表 6-5）	表 6-5 部分国产光电三极管的技术参数					
	型号	$U_{\text{CEO}}(\text{V})$	$I_D(\mu\text{A})$	$I_L(\mu\text{A})$	$t_r, t_f(\text{ns})$	$\lambda_p(\text{nm})$
	3DU52	50	0.1		15	880
	3DU2E	10		0.5		
	3DU11	30		1		
	3DU22	100	0.1	1	15	880
	3DU23	10		2		
	3DU24	30		0.5		
	3DU31	10	0.1	3	15	880
	3DUOA	10	0.2	5		
	3DU3S	10		2		
	3DU5S				15	880
	DU18				15	880

6.2.5 光电三极管的检测与识别

1. 好坏检测

1) 测量暗电阻	将光电三极管的受光窗口遮住，再将万用表置于 $R \times 1k\Omega$ 挡。红表笔和黑表笔分别接光电三极管的两个引脚。正常时，光电管的正反向电阻均为无穷大。如测得电阻为一定值或阻值接近于零，说明该光电三极管已漏电或已击穿短路，不能再用。
2) 测量亮电阻	将光电三极管的受光窗口靠近光源，正常情况下，电阻值为 $15 \sim 30k\Omega$ ，否则说明该管已开路损坏或灵敏度偏低。

2. 引脚识别

1) 引脚数	光电三极管的基极为受光窗口，多数光电三极管只有发射极和集电极两个引脚，基极无引出线。但也有的光电三极管是三个引脚。
2) 金属壳封装	金属壳下沿有一个凸块，与凸块最近的引脚是发射极。另一个引脚是集电极。如果有三只引脚，与发射极最近的引脚是基极，离发射极远的引脚是集电极。
3) 环氧树脂封装	对于环氧树脂封装的平头式、微型光电三极管，长引脚为发射极，短引脚为集电极。
4) 光电达林顿管	对于光电达林顿型管，封装缺圆的一侧为集电极引脚，另一侧为发射极引脚。

3. 光电二极管和光电三极管的识别

光电二极管和光电三极管在外观上非常相似，识别有一定难度，通常多用测量电阻的方法进行分辨。

将万用表置于 $R \times 1k\Omega$ 挡，将待测光电管的受光窗口遮盖，测量光电管两只引脚间的正反向电阻值。如果正反向电阻值都很大（一般为无穷大），所测的光电管是光电三极管；如果测得的正反向电阻值有非常明显的差别，正向电阻值较小（一般在 $10 \sim 30k\Omega$ 左右），而反向电阻值为无穷大，则所测的管子是光电二极管。

4. 红外发光二极管和光电三极管的识别

1) 观察	若管子都是透明树脂封装，可用观察管芯法，红外发光二极管管芯下有一个浅盘，光电三极管没有。
2) 用万用表	当管子尺寸过小或是黑色树脂封装时，可将万用表置于 $R \times 1k\Omega$ 挡，测量电阻。遮挡受光窗口后，测得的正向电阻为 $20 \sim 40k\Omega$ 、反向电阻大于 $200k\Omega$ 的是红外发光二极管；正反向电阻都接近 ∞ （无穷大）的是光电三极管。

6.2.6 应用电路

1. 暗通控制电路

暗通光电控制电路如图 6-28 所示。图中 J 是继电器，L 是照明灯，S 为控制开关，VD 为续流二极管，E 为直流电源电压， I_c 是晶体管 VT 的集电极电流， I_b 是基极电流。

当开关 S 打开时, L 不亮, 无光照时, 光电三极管不导通, B 点电位接近直流电源电压 E , 三极管 VT 导通并饱和, 继电器动作。

当开关 S 闭合后, 照明灯 L 亮, 光电三极管导通, B 点电位接近零, 三极管 VT 不导通, 继电器不动作。

由此可知, 只要控制开关 S 开闭, 就能控制继电器的通断。并接在继电器线圈的二极管 VD, 可防止晶体管 VT 关闭时在集电极上发生瞬间过电压。

2. 亮通控制电路

亮通光电控制电路如图 6-29 所示。图中 J 是继电器, L 是照明灯 (即光源), S 为控制开关, VD 为续流二极管, E 为直流电源电压, I_c 是晶体管 VT 的集电极电流, I_b 是基极电流。

当开关 S 打开时, L 不亮, 无光照时, 光电三极管不导通, B 点电位近似为零, 三极管 VT 截止, 继电器不动作。

当开关 S 闭合后, 照明灯 L 点亮, 光电三极管导通, B 点电位接近直流电源电压 E , 三极管 VT 导通并饱和, 继电器动作。通过控制开关 S 的开闭, 就能控制光继电器的通断。同继电器线圈并联的二极管是续流二极管, 它可防止晶体管 VT 关闭时在集电极上发生瞬间过电压。

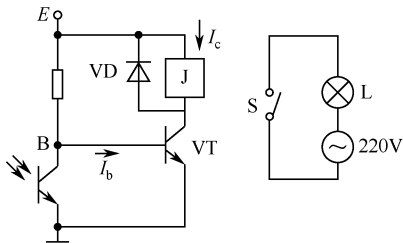


图 6-28 光继电器的暗通控制电路

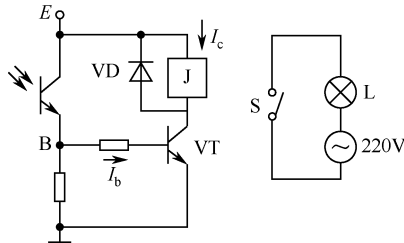


图 6-29 光继电器的亮通控制电路

6.3 发光二极管

6.3.1 发光二极管基本知识

1. 符号

1) 文字符号

发光二极管的文字符号为 LED, 也有用 DF、VD、VL 表示的。

2) 图形符号

发光二极管的图形符号如图 6-30 所示。其中, (a) 为国标图形符号, (b) 为其他图形符号。

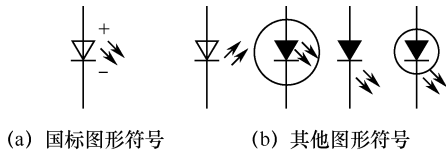


图 6-30 发光二极管的图形符号

2. 外部形状

发光二极管有不同的产品系列、规格和型号，外部形状也多种多样，常见发光二极管的外部形状如图 6-31 所示。

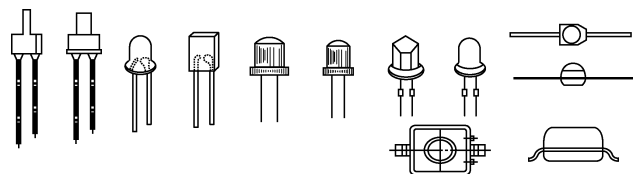


图 6-31 常见发光二极管的外部形状

3. 常见发光二极管

发光二极管是由半导体材料制成的、具有单向导电和可发光特性的二极管。它广泛应用于各种电子控制、家电、仪表等设备的指示灯和照明、数码显示、电子显示屏、电视及各种亮化工程等。常见发光二极管如图 6-32 所示。

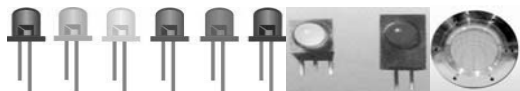


图 6-32 常见发光二极管

4. 基本结构

发光二极管通常用砷化镓、磷化镓、磷砷化镓、磷铟砷化镓或砷铝化镓等材料制成。它是直接将电能转变成光能的发光器件。发光二极管的基本结构示意图如图 6-33 所示。

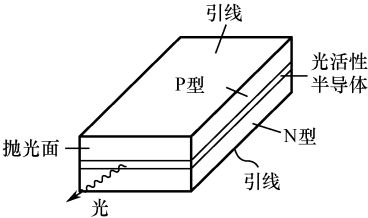


图 6-33 发光二极管的基本结构示意图

5. 性能特点

1) 工作电压低	LED 的工作电压通常为 5~24V，产品不同，工作电压也往往不同。
2) 节能	在光效相同的情况下，消耗的能量较白炽灯减少 80%，节能效果十分明显。
3) 适用性强	单元 LED 芯片很小，可以根据实际需要制成各种形状的器件，以适应不同环境、地点设备和功能等的需要。
4) 响应快	LED 的响应时间很短，一般为纳秒级，而白炽灯的响应时间一般为毫秒级。
5) 无污染	LED 内不含重金属汞，对环境污染很少。
6) 变色方便	通过改变流过 LED 的电流大小就可以改变二极管的发光颜色，十分方便。例如，小电流时为红色的 LED，随着电流的增加，可依次变为橙色、绿色等。
7) 寿命长	LED 的寿命主要取决于光强或光亮度的衰减。如果以 LED 的光强或亮度衰减至原来的 35%作为寿命的依据，那么 LED 的寿命超过 6000 小时（h）。
8) 体积小	重量轻，便携带，易安装。

6. 内部结构

发光二极管的内部结构如图 6-34 所示。管内部的两个电极一大一小。一般来说，电极较小、个头较矮的是发光二极管的正极，电极较大的是负极。

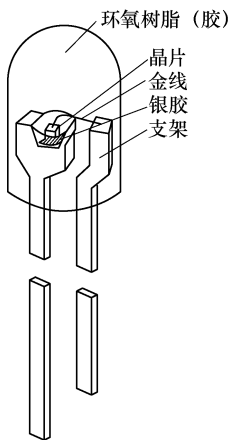


图 6-34 发光二极管的内部结构

7. 工作原理

(1) 当发光二极管加正向电压时，PN 结 P 区的空穴注入到 N 区，N 区的电子注入到 P 区，注入的空穴在 N 区、注入的电子在 P 区会产生复合，复合时产生的能量绝大部分转变为光。
(2) 发光亮度大致和工作电流密度成正比，但用掺有氧化锌（ZnO）和磷化镓（GaP）杂质的半导体材料制作的发光二极管，其发光亮度随电流密度的增加会很快趋向饱和。
(3) 当 PN 结的温度升高、其他条件不变时，发光亮度会减弱。
(4) 二极管的正向压降会因发光颜色的不同而不同。例如红色发光二极管的管压降一般为 2.0~2.2V，黄色发光二极管的管压降一般为 1.8~2.0V，绿色发光二极管的压降通常为 3.0~3.2V。
(5) 发光二极管正常发光时的额定电流约为 10~20mA。
(6) 当发光二极管中有足够电流流过时就会发光，但其光谱范围较窄，所发出光线的波长决定发光的颜色，光线的波长又取决于制造发光二极管所用的半导体材料。材料不同，发光颜色也不同。
(7) 发光二极管发出光的颜色取决于波长。例如，紫色光的波长范围约为 380~470nm，蓝色光的波长范围约为 470~500nm，纯绿色光的波长约为 505~540nm，黄绿色光的波长约为 565~575nm，黄色光的波长约为 580~595 nm，琥珀色光的波长约为 600~610nm，橙色光的波长约为 615~640nm，红色光的波长约为 645~660nm，深红色光的波长约为 670~690nm，暗红色光的波长范围波长约为 700~780nm。
(8) 二极管目前还不能直接发出白色光，平常看到的白色光一般由两种方法获得。一是由红、绿、蓝三基色按亮度比例混合而成的，其中绿色的亮度约为 69%，红色的亮度约为 21%，蓝色的亮度约为 10%，这种获得白色光的方法称为配色。当三基色发光强度的比例为 3:6:1 时，一般可获得较为满意的白色光。 获得白色光的第二种方法是 LED+不同色光的荧光粉。例如，用紫外或紫光 LED+RGB 荧光粉、用蓝光 LED+红绿荧光粉、用蓝光 LED+黄色荧光粉来合成白色光。 白色发光二极管的正向电压降为 3.5V 左右，正向工作电流需要大于 15mA 时才能正常发光。
(9) 基色（也称原色）是指能合成各种颜色的基本颜色，通常说的三基色是红（R）、绿（G）、蓝（B）。

8. 型号命名

发光二极管的国产型号尚不尽一致。部标以字母 FG 开头，后跟 6 位数字，如 FG××××××。

常用的国产普通单色发光二极管有 BT（厂标型号）系列、FG（部标型号）系列和 2EF 系列。常用的进口普通单色发光二极管有 SLR 系列和 SLC 系列等。

<p>（1）第一位数字表示制造用材料，数字可以是 1、2、3、4。数字的具体含义是：1—表示材料为磷砷化镓（GaAsP）；2—表示材料为砷铝化镓（GaAlAs）；3—表示材料为磷化镓（GaP）；4—表示材料为磷铟砷化镓（GaAsInP）。</p>
<p>（2）第二位数字表示发光颜色，用数字 1~6 表示。数字的具体含义是：1—表示为红色；2—表示为橙色；3—为黄色；4—为绿色；5—为蓝色；6—表示为复合色。</p>
<p>（3）第三位数字表示封装形式，用数字 3、4 表示。数字的具体含义是：3—表示为 W 形封装；4—表示为 T 形封装。</p>
<p>（4）第四位数字表示外形，用数字 0~6 表示。数字的具体含义是：0—表示外形为圆形；1—表示为矩形；2—表示为符号形；3—表示为三角形；4—表示为方形；5—表示为组合形；6—表示为特殊形。</p>
<p>（5）第五位数字和第六位数字表示序号。例如，发光二极管的型号是 FG314101。其中，FG—表示发光二极管；3—表示制造材料为磷化镓；1—表示发光颜色为红色；4—表示为 T 形封装；1—表示外形为矩形；01—表示序号。</p>

9. 发光二极管分类

1) 按颜色分类	<p>（1）按发光颜色：可分为有色和无色两大类。有色类又分成白色、红色、橙色、绿色、蓝色光和红外光等。</p>
	<p>（2）按波长：可细分为紫红、纯红、琥珀、橙、橙黄、黄、黄绿、纯绿、翠绿、蓝绿、纯蓝、蓝紫色等。</p>
	<p>（3）按管体颜色：可分为红色、琥珀色、黄色、橙色、浅蓝色、绿色、黑色、白色、无色等。</p>
2) 按制造材料分类	<p>按制造材料可分为磷化镓发光二极管、磷砷化镓发光二极管、砷化镓发光二极管、磷铟砷化镓发光二极管和砷铝化镓发光二极管等多种。</p>
3) 按封装结构和材质分类	<p>按封装结构和材质可分为无引线表面封装、全环氧树脂封装、金属底座环氧树脂封装、陶瓷底座环氧树脂封装及玻璃封装等。</p>
4) 按封装透明度及散射分类	<p>按封装透明度及颜色散射情况可分为有色散射（D）、无色散射（W）、有色透明（C）和无色透明（T）封装。</p>
5) 按出光面特征分类	<p>按出光面特征可分为圆形、方形、矩形、三角形、组合形、面发光形、侧向形、表面贴装型发光二极管等。圆形发光二极管的直径有 $\phi 2\sim\phi 20\text{mm}$ 多种规格。</p>
6) 按发光强度角分布分类	<p>按发光强度角的分布情况可分为高指向型（半值角为 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 或更小）、标准型（半值角为 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$）和散射型（半值角为 $45^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 或更大）。</p>
7) 按发光强度和工作电流分类	<p>按发光强度和工作电流可分为普通亮度发光二极管，发光强度小于 10mcd（触光）；高亮度发光二极管，发光强度为 10~100mcd；超高亮度发光二极管，发光强度大于 100mcd。</p> <p>一般发光二极管的工作电流在十几毫安至几十毫安；低电流 LED 的工作电流小于 2mA（亮度与普通发光管相近）。</p>

6.3.2 LED 特性

1. 伏安 (U - I) 特性

LED 的 U - I 特性曲线如图 6-35 所示。曲线主要由正向工作区、正向死区、反向死区和反向击穿区 4 段构成。关系呈非线性，外加正偏压时表现为低接触电阻；外加反向偏压时表现为高接触电阻。

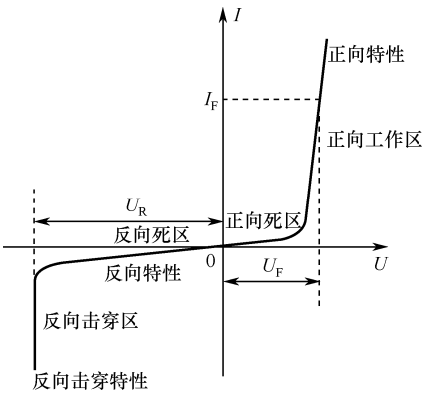


图 6-35 发光二极管的 U - I 特性曲线

1) 正向死区

当外加正向电压小于二极管的开启电压 U_F 时，二极管不导通，特性曲线为正向死区，通过的电流很小。不同材料制成的 LED 的开启电压也是不同的。例如，GaAs 的为 1V，GaAsP 的为 1.2V，GaP 的为 1.8V，GaN 的为 2.5V。

2) 正向工作区

当外加正向电压大于开启电压后，二极管导通，正常工作电流 I_F 与外加电压呈近似线性关系，电流随外加电压的增高而变大。普通发光二极管的正向饱和压降为 1.6~2.2V。

3) 反向死区

当外加反向偏压小于管子的反向击穿电压 U_R 时，二极管处于截止状态，特性曲线为反向死区，流过的反向漏电流通常小于 10 μ A。

4) 反向击穿区

当外加反向偏压大于反向击穿电压后，二极管被反向击穿，反向电流会急剧增加。但由于发光管所用材料种类不同，各种 LED 的反向击穿电压也不同。

2. 光学特性

1) 发光强度	发光强度（也称法向光强）是表征发光管发光强弱的物理量。当 LED 采用圆柱、圆球封装时，具有很强的指向性。发光强度在法线方向上的值最大，并随偏离法线方向的分布角的变化而变化。
2) 发光强度的分布角	发光强度的分布角是描述 LED 发出的光线在空间各个方向上的光强分布。几种常用圆形 LED 分布角为 5°、10°、30°、45°。
3) 光谱分布	二极管光强度或光功率的输出是随着波长的变化而变化的，其相互关系可以绘成一条曲线，即光谱分布曲线。分布曲线确定后，主波长、纯度等相关色度学参数亦随之而定。

4) 各色发光二极管的发光特点	<p>(1) 强度可调: 标准红光、绿光和黄光 LED 和电阻串联后接入电路, 只要电路的工作电压保持恒定, LED 就可以发出恒定强度的光。改变串联电阻的阻值就能调节光的强度。</p> <p>(2) 正向压降: 标准红光、绿光和黄光 LED 的正向导通电压范围是 1.5~3.2V, 正向压降随着正向电流的增大而增加。但正向电流小于 10mA 时, 正向电压变化很小, 红光 LED 的变化约为 200mV, 其他色彩约为 400mV 或更小。</p> <p>(3) 色彩稳定: 标准 LED 的正向电流、工作电压、环境温度变化时所产生的色彩(发射波长)保持相对稳定。</p> <p>(4) 蓝光: 蓝光 LED 用氮化镓制造时, 光的峰值波长范围为 460~490nm。</p>
5) 峰值波长	<p>峰值波长是指 LED 发出的光强度相对最强(即光功率输出最大)的波长。例如蓝色 LED 的峰值波长为 460~465nm, 绿色 LED 的峰值波长约为 550nm, 深红色 LED 的峰值波长为 680~700nm, 红外线的峰值波长约为 910nm。</p>

3. 时间特性

时间特性(也称响应时间)是表征显示器跟踪外部信息变化的快慢。从实用角度来看, 时间特性就是 LED 点亮或熄灭时所延迟的时间, 通常用 t_r 和 t_f 表示。	<p>(1) 点亮时间(即上升时间, t_r): 点亮时间是指接通 LED 电源使发光亮度达到正常值的 10%开始, 一直到发光亮度达到正常值的 90%所经历的时间。</p> <p>(2) 熄灭时间(即下降时间, t_f): 熄灭时间是指从正常发光强度减弱至正常值的 10%所经历的时间。</p> <p>不同的 LED, 响应时间也不相同。例如, 用 GaAs、GaAsP、GaAlAs 制成的 LED 的响应时间小于 10^{-9}s; 由 GaP 制成的为 10^{-7} s。</p>
---	---

4. 热学特性

LED 的光学特性与 PN 结的结温有很大关系。一般工作电流 I_F 小于 20mA, 长时间连续工作时, PN 结的温升不明显。

环境温度如果较高, 会导致 LED 发光的均匀性、一致性变差, 影响 LED 点阵、大显示屏等的可靠性及稳定性, 为此需要专门设计通风冷却系统。

6.3.3 LED 参数

1. 主要参数

1) 正向工作电流 (I_F)	<p>正向工作电流是指发光二极管两端施加一定电压后所产生的正向电流。I_F 的大小与所施正向电压的大小有关。正常发光时, 二极管的工作电流一般是 5~20mA。在实际使用中可根据需要选择, 通常选 I_F 在最大正向电流的 (I_{Fm}) 的 0.6 倍以下。</p>
2) 正向工作电压 (U_F)	<p>正向工作电压是施加在二极管两端、使其正常发光的电压, 一般是在流过的正向电流等于 20mA 时测得的。发光二极管正向工作电压一般为 1.4~3V。但在外界温度升高时, 正向工作电压会有所下降。</p>

3)最大允许功耗 (P_m)	二极管的消耗功率为 $P=U_F\times I_F$ ，式中， I_F 为流过 LED 的电流， U_F 为管子两端间的电压，即管压降。最大允许功耗是指允许加在 LED 两端的正向直流电压与流过的正向电流之积的最大值。即在保证发光二极管正常工作的条件下所允许消耗的最大功率。实际消耗功率一旦超过此值，LED 就会发热，直至损坏。
4)最大正向直流电流 (I_{Fm})	最大正向直流电流是指在正常工作时允许通过发光二极管的最大电流。实用时二极管中流过的电流一旦超过此值，就可能损坏发光二极管。
5)最大反向电压 (U_{Rm})	最大反向电压是指发光二极管正常工作时两端所允许施加的最大反向电压。实际施加的电压一旦超过此值，发光二极管就可能被击穿损坏。
6)光通量 (F)	光通量是指 LED 发出的总的光辐射能量，是 LED 向各个方向发出的光能量之和。工作电流增加，发出的光通量也增大。可见光 LED 的光通量单位为流明 (lm)。单色 LED 的光通量最大约 1.0lm，白光 LED 的光通量约为 1.5~1.8lm (小芯片)。
7)发光强度 (I_V)	发光二极管的发光强度通常是指其法线 (对圆柱形发光管是指其轴线) 方向上的发光强度。若在该方向上辐射强度为 (1/683) W/sr 时，则发光是 1 坎德拉 (符号为 cd)。由于一般 LED 的发光强度小，所以发光强度常用烛光 (mcd) 作单位。
8)工作环境温度 (t_{opm})	工作环境温度是指发光二极管可正常工作环境温度范围。低于或高于此温度范围，发光二极管的效率会大大降低，甚至不能正常工作。

2. 管芯材料及参数

几种常见发光二极管的制造材料和主要参数见表 6-6。

表 6-6 常见发光二极管管芯材料的主要特性参数

基本材料	正向电压 (10mA 时, V)	光强 (10mA 时, 张角±45°)	光功率 (μW)	颜色	波长 (nm)
砷化镓	1.3~1.5	0.4~1 2~4 1~3 0.5~3	100~500	红外	900
磷砷化镓	1.6~1.8		1~2	红	655
磷砷化镓	2.0~2.2		5~10	鲜红	635
磷砷化镓	2.0~2.2		3~8	黄	583
磷化镓	2.2~2.4		1.5~8	绿	565

3. 贴装发光二极管常见型号及参数

常见贴装发光二极管的特性参数见表 6-7。

表 6-7 常见贴装发光二极管的特性参数

型号	芯片材质	发光颜色	波长 (nm)	光电特性		1/2 视角
				正向电压 (V)		
				一般值	最大值	
1206LWCT 0305LWCT 0603LWCT	GaInN	白色	—	3.0	3.4	130°
1206LBCT 0805LBCT 0603LBCT	GaInN	蓝色	470	3.0	3.4	130°

(续表)

型号	芯片材质	发光颜色	波长 (nm)	光电特性		1/2 视角
				正向电压（V）		
				一般值	最大值	
1206PGOC	GaInN	蓝绿	505	3.0	3.4	130°
1206LGCT 0805LGCT 0603LGCT	GaInN	纯绿	525	3.0	3.4	130°
1206KGCT 0805KGCT 0603KGCT	GaAlInP	绿色	570	1.8	2.2	130°
1206KYCT 0805KYCT 0603KYCT	GaAlInP	黄色	590	1.8	2.2	130°
1206KRCT 0805KRCT 0502KRCT	GaAlInP	红色	635	1.8	2.2	130°

4. 单色发光二极管主要参数

常见 BT 系列单色闪烁发光管的主要技术参数见表 6-8。

表 6-8 常见 BT 系列单色闪烁发光管的主要技术参数

参数 型号	最大耗散功率 (W)	最大工作电流 (W)	正向电压 (V)	反向电压 (V)	反向电流 (μA)	波长 (nm)	发光颜色
BT101	0.05	20	≤2	≥5	≤50	650	红
BT102	0.05	20	≤2.5	≥5	≤50	700	红
BT214	0.09	40	≤2.5	≥5	≤50	585	黄
BT301	0.09	120	≤2	≥5	≤200	650	红
BT302	0.09	120	≤2.5	≥5	≤200	700	红
BT112/X	0.05/0.1	20	≤2.5	≥5	≤50	700	红
BT113/X	0.05/0.1	20	≤2.5	≥5	≤50	565	绿

6.3.4 术语及应用

1. 常见名词术语

1)光通量(Φ) 及单位	光通量是指光源发射并可以被人的眼睛接收的能量总和，单位是流明（lm）。
2)光强及单位	光强是可见光在某一特定方向角内所发射的强度，单位是坎德拉（cd）。一般情况下，光线都是向不同方向发射的，且强度各异。
3)照度（E） 及单位	照度是指被照射表面单位面积上的光通量。单位是勒克司（lx）。一勒克司是一流明的光通量平均分布在一平方米平面上的明亮度。
4) 发光效率	LED 的发光效率是指 LED 辐射出的光能量（发光量）与输入的电能量之比。

5) 发光亮度	LED 的发光亮度随着流过的电流密度的增加而增大，随着环境温度的升高而减小。蓝天和荧光灯的表面亮度约为 7000Nit (尼特)，从地面看太阳表面亮度约为 $14\times10^8\text{Nit}$ 。
6) 光效及单位	光效是指由电能转换成光能的效率，越高越好，单位是流明/瓦 (lm/W)。
7) 光色	(1) 冷色：冷色是指色温大于 5000K 的光色，为清凉型（带蓝的白色），给人以清冷、凉爽的感觉。 (2) 中间色：中间色是指色温在 3300~5000K 范围的光色，为中间型（白色），给人以清新爽快的感觉。 (3) 暖色：暖色是指色温小于 3300K 的光色，为温暖型（带红的白色），给人以稳重和温暖的感觉。
8) 色温	(1) 黑体：在任何条件下，对任何波长的外来辐射完全吸收而无任何反射的物体，即吸收比为 1 的物体。 (2) 当光源所发出的颜色与“黑体”在某一温度下辐射的颜色相同时，“黑体”的温度就称为该光源的色温。蓝光越多，色温越高。 例如，标准烛光为 1930K；烛光约为 1500K；钨丝灯一般为 2800~3200K；荧光灯一般为 3500~4500K；家用白炽灯一般为 2500~3200K；闪光灯约为 3800K；中午阳光约为 5400K；电子闪光灯为 6000K；蓝天为 12000~18000K。

2. LED 应用

1) 全彩 LED	将红色、绿色、蓝色三种发光 LED 芯片集成和封装在一个 LED 管壳内，并且按一定的规则排列，有多个引线，可实现单个 LED 的全彩功能，通过混色调节可以产生各种颜色及白光。
2) 变色 LED	有些 LED 的工作电流变化时可以实现变色，实现红、黄、绿、蓝、橙多色发光。例如，小电流时为红色的 LED，随着电流的增加，可依次变为橙色、黄色、绿色。
3) 全彩 LED 显示屏	LED 全彩显示屏是将红色、绿色、蓝色三种发光二极管按一定规则排列，利用红、绿、蓝三基色原理，在计算机控制下使三种颜色具有 256 级灰度并任意混合，即可产生 $256\times256\times256=16\,777\,216$ 种颜色，形成不同光色的组合，变化多端，丰富多彩，可以形成各种图像并显示动态变化。

6.3.5 红外发光二极管

红外发光二极管（也称红外线发射二极管）是在加正向电压时能将电能直接转换成红外光（不可见光）并辐射出去的二极管。所谓红外线就是在可见红色光以外（波长大于 $0.76\mu\text{m}$ ）的、人眼看不到的光线。红外线一般划分为近红外线，波长为 $0.75\sim1.50\mu\text{m}$ ；中红外线，波长为 $1.50\sim6.0\mu\text{m}$ ；远红外线，波长为 $6.0\sim1000\mu\text{m}$ 和无线电波。

常用的红外发光二极管有 SIR 系列、SIM 系列、HG 系列、HIR 系列、PLT 系列、GL 系列等多种。

1. 外部形状

常见红外发光二极管外形如图 6-36 所示。

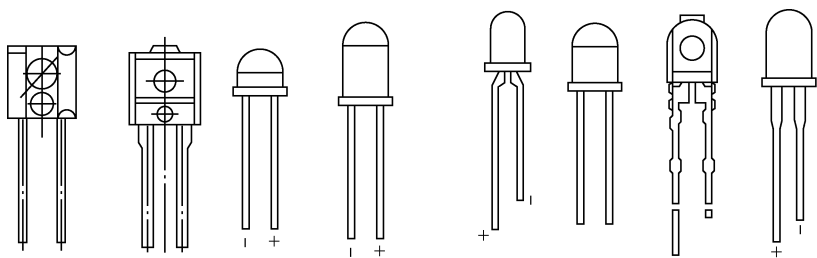


图 6-36 常见红外发光二极管的外形图

2. 原理与材料

红外发光二极管的结构、原理与普通发光二极管相似，只是使用的半导体材料不同。红外发光二极管通常使用砷化镓、砷铝化镓等材料，采用全透明或浅蓝色、黑色的树脂封装。

3. 分类

常见红外发光二极管按功率分为小功率（1~10mW）、中功率（20~50mW）和大功率（50~100mW 以上）红外发光二极管三大类。通常直径为 3~5mm 的是小功率红外线发射管；直径为 8~10mm 的是中功率及大功率发射管。

4. 伏安特性曲线（见图 6-37）

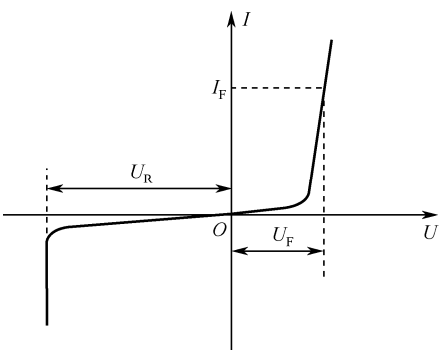


图 6-37 伏安特性曲线

5. 参数

1) 物理参数	<p>(1) 波长：常用红外发光二极管发射的红外线波长主要有 800nm、850nm、870nm、880nm、940nm、960nm、980nm 等几种；同样情况下，发射的红外光波长越长，发射功率也越小。</p> <p>(2) 峰值波长：发光二极管发射的能量大小在各处是不同的，发射能量峰值位置所对应的波长就是峰值波长。例如，砷化镓发光二极管的峰值波长约为 935nm。</p>
2) 电参数	<p>砷化镓红外发光二极管的门槛电压约 1.0V，其他镓质红色发光二极管的门槛电压约 1.8V；绿色发光二极管的门槛电压在 2.0V 左右。当施加的电压超过门槛电压后，电流便急速上升。环境温度对二极管的门槛电压影响很大，当温度较高时，门槛电压数值会降低，反之会升高。</p>

2) 电参数	小功率红外发射管的正向压降通常为 1.1~1.5V, 工作电流约 20mA; 中功率红外发射管的正向压降一般为 1.4~1.65V, 工作电流范围是 50~100mA; 大功率发射管的正向压降多为 1.5~1.9V, 工作电流范围一般为 200~350mA。
3) 热损	红外发光二极管的热损失是因外加的电压 U_F 及所产生的电流 I_F 累积而来的, 除了一小部分能量作为光发射外, 大部分形成热能而散发, 所散发的热能即所谓的损失。二极管的功率损耗在最大值的 60% 以下时, 使用是安全的, 功率损耗的最大值与周围温度也有关系。

6. 特性

1) 伏安特性	<p>红外发光二极管的伏安特性如图 6-37 所示。在加正向电压时, 会产生正向电流。它提供了红外发光二极管发射出光束的能量, 其发光的条件与一般的发光二极管(LED) 一样, 只是红外线为不可见光。</p> <p>红外发光二极管工作在反向电压时, 只有微小的漏电流流过; 但反向电压超过击穿电压时, 便立即产生很大的电流, 将使元件烧毁, 一般红外二极管的反向耐压值为 3~6V。使用时尽量避免这种情形发生。</p>
2) 方向特性	<p>红外发光二极管的发射强度随发射方向的变化而变化。当方向角为零度时, 其发射强度规定为 100%, 方向角度越大发射强度越小。如由光轴取其方向角度一半时, 发射强度的值为峰值的一半时, 所对应的方向角度称为方向半值角。此角度越小, 表示二极管的指向性越灵敏。</p> <p>红外发光二极管通常均带有透镜, 使其指向性更好、更灵敏。</p>
3) 距离特性	<p>(1) 红外二极管的辐射强度与光轴上距离的平方成反比, 距离越远, 辐射强度越弱。</p> <p>(2) 红外线的控制距离与发射功率成正比。发射功率越大, 控制距离越远。为了增加红外线的控制距离, 可使红外发光二极管工作于脉冲状态, 脉冲频率一般在 300kHz 以下。</p>
4) 接收方式	红外线的接收方式有直射式和反射式两种。直射式是指发光管和接收管分别安装在发射器和受控器中, 一发一收, 中间有一定距离; 反射式是指发光管与接收管并排安装在一起。发光管发出的红外光线遇到障碍物后反射回来, 接收管才能收到反射回来的光线而工作。

7. 红外发光二极管的主要参数

(1) 常用 HR 系列红外发光二极管的主要技术参数如表 6-9 所示。

表 6-9 常用 HR 系列红外发光二极管的主要技术参数

参数 型号	耗散功率 (mW)	正向电 流 (mA)	正向电 压 (V)	反向电 流 (μ A)	反向电 压 (V)	发射功率 1 (mW)	发射功率 2 (mW)	峰值波 长 (nm)	截止频率 (MHz)
HG301	75	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	1~3	5~10	940	≥ 1
HG302	75	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	3~5	10~15	940	≥ 1
HG306	75	50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	> 5	> 15	940	≥ 1
HG311/S	50/75	35/50	≤ 1.5	≤ 50	≥ 5	1~3	5~10	940	≥ 1

(2) 常用 SIR、SIM 系列红外发光二极管的主要技术参数如表 6-10 所示。

表 6-10 常用 SIR、SIM 系列红外发光二极管的主要技术参数

参数 型号	额定功率 (mW)	最高正向电流 (mA)	正向电压 (V)	峰值波长 (nm)
SIR-320ST3	9	75	1.2	940
SIR-33ST3	3.5	50	1.4	950
SIR-381SB3	8	100	1.4	950
SIR-481ST3	19	100	1.4	940
SIR-482ST3	9	100	1.3	940
SIR-56SB3	8	100	1.38	950
SIR-567ST3	9	75	1.6	880
SIM-192ST	—	50	1.15	950
SIM-20SB	6.5	50	1.25	950
SIM-22ST	0.48	50	1.25	950

8. 红外发光二极管的应用

1) 应用领域

红外发光二极管通常使用直流电压工作，提供高效单色光源；它也可用于脉冲工作条件下的数据传输（红外遥控），还可用于为延长控制距离或抑制环境可见光和红外线干扰的场合。

它广泛用于遥控、探测、安防、光盘监测、光电开关、光传感器、夜视仪、电脑等便携设备的红外数据传输系统等。

2) 实用电路

红外发光二极管实用电路如图 6-38 所示。图中，TC9132P 是红外遥控信号发射集成电路。其 18 引脚为传输线信号输出端；19 引脚为传输线信号输出指示端。平时 18、19 引脚皆为高电平，有输出信号时变为低电平。当 18 引脚有输出时，18、19 都是低电平，三极管 VT1、VT2、VT3 皆导通，红外发光二极管 LED 因有电流流过而发光。R1、R2 可限定三极管的基极电流，R3 是限流电阻，保证 LED 的正常工作。

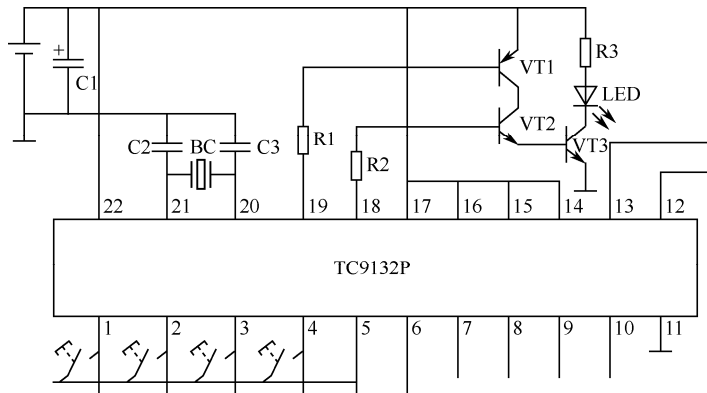


图 6-38 红外发光二极管实用电路

6.3.6 其他发光二极管

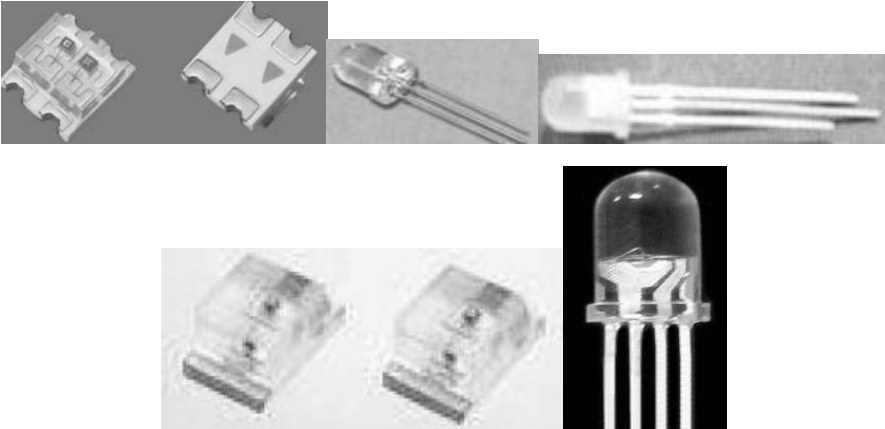
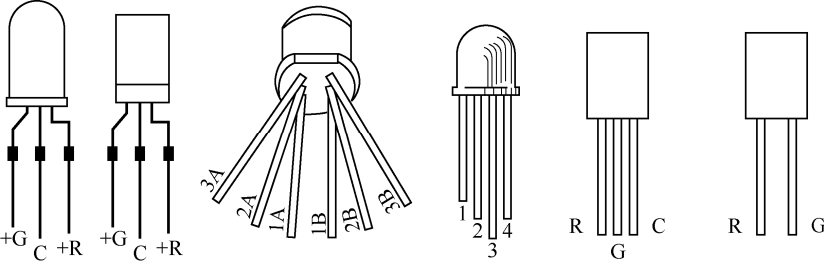
1. 高亮度单色发光二极管和超高亮度单色发光二极管

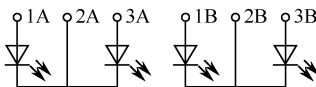
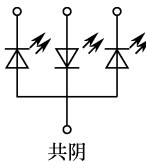
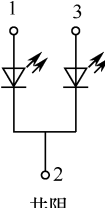
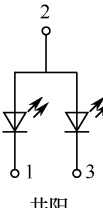
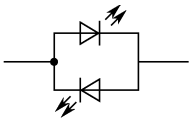
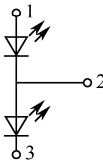
1) 制造材料	高亮度单色发光二极管通常使用砷铝化镓（GaAlAs）等材料制成。 超高亮度单色发光二极管一般使用磷铟砷化镓（GaAsInP）等材料制造。																																																													
2) 性能特点	(1) 寿命可长达 10 万小时，较同光效的白炽灯节能 80%以上。 (2) LED 的驱动电压低，通常为 6~24V。 (3) 内部无有害金属汞，对环境污染很小。																																																													
3) 高亮度红色发光二极管 主要参数（见表 6-11）	<table><tr><th colspan="9">表 6-11 常用高亮度红色发光二极管的主要参数</th></tr><tr><th>参数 型号</th><th>最大耗散 功率（W）</th><th>最大工作 电流 （mA）</th><th>正向 电压 （V）</th><th>反向电压 （V）</th><th>反向 电流 （μA）</th><th>波长 （nm）</th><th colspan="2">材料</th></tr><tr><td>BT116-X</td><td>0.1</td><td>20</td><td><2.5</td><td>>5</td><td><100</td><td>660</td><td colspan="2">GaAlAs</td></tr><tr><td>BT316-X</td><td>0.1</td><td>20</td><td><2.5</td><td>>5</td><td><100</td><td>660</td><td colspan="2">GaAlAs</td></tr><tr><td>BT416-X</td><td>0.1</td><td>20</td><td><2.5</td><td>>5</td><td><100</td><td>660</td><td colspan="2">GaAlAs</td></tr><tr><td>BT616-X</td><td>0.1</td><td>20</td><td><2.5</td><td>>5</td><td><100</td><td>660</td><td colspan="2">GaAlAs</td></tr></table>								表 6-11 常用高亮度红色发光二极管的主要参数									参数 型号	最大耗散 功率（W）	最大工作 电流 （mA）	正向 电压 （V）	反向电压 （V）	反向 电流 （μA）	波长 （nm）	材料		BT116-X	0.1	20	<2.5	>5	<100	660	GaAlAs		BT316-X	0.1	20	<2.5	>5	<100	660	GaAlAs		BT416-X	0.1	20	<2.5	>5	<100	660	GaAlAs		BT616-X	0.1	20	<2.5	>5	<100	660	GaAlAs	
表 6-11 常用高亮度红色发光二极管的主要参数																																																														
参数 型号	最大耗散 功率（W）	最大工作 电流 （mA）	正向 电压 （V）	反向电压 （V）	反向 电流 （μA）	波长 （nm）	材料																																																							
BT116-X	0.1	20	<2.5	>5	<100	660	GaAlAs																																																							
BT316-X	0.1	20	<2.5	>5	<100	660	GaAlAs																																																							
BT416-X	0.1	20	<2.5	>5	<100	660	GaAlAs																																																							
BT616-X	0.1	20	<2.5	>5	<100	660	GaAlAs																																																							
4) 超高亮度单色发光二极 管的主要参数	<p>(1) 超高亮度发光二极管有三种颜色，但各种颜色的发光二极管的压降不同。红色的压降为 2.0~2.2V；黄色的压降为 1.8~2.0V；绿色的压降为 3.0~3.2V。正常发光时的额定电流均为 20mA。</p> <p>(2) 典型特性：当加在超高亮度二极管上的正向电压超过导通电压后，正向压降和正向电流基本是线性关系。</p> <p>(3) 工作电流与压降：超高亮度 LED 的最大正向电流可达 1.0A，正向压降通常为 2~3.6V。</p> <p>(4) 主要参数：常用超高亮度单色发光二极管的主要参数见表 6-12。</p> <table><tr><th colspan="9">表 6-12 常用超高亮度单色发光二极管的主要参数</th></tr><tr><th>参数 型号</th><th>最大耗 散功率 （W）</th><th>最大工 作电流 （mA）</th><th>正向 电压 （V）</th><th>反向电 压 （V）</th><th>反向电 流 （μm）</th><th>波长 （nm）</th><th>发光 颜色</th><th>材料</th></tr><tr><td>BT1142</td><td>0.1</td><td>20</td><td><2.4</td><td>>5</td><td><100</td><td>645</td><td>红</td><td>AlGzInP</td></tr><tr><td>BT1143</td><td>0.1</td><td>20</td><td><2.4</td><td>>5</td><td><100</td><td>656</td><td>绿</td><td>AlGzInP</td></tr><tr><td>BT1144</td><td>0.1</td><td>20</td><td><2.4</td><td>>5</td><td><100</td><td>595</td><td>黄</td><td>AlGzInP</td></tr><tr><td>BT1147</td><td>0.1</td><td>20</td><td><2.4</td><td>>5</td><td><100</td><td>620</td><td>橙</td><td>AlGzInP</td></tr></table>								表 6-12 常用超高亮度单色发光二极管的主要参数									参数 型号	最大耗 散功率 （W）	最大工 作电流 （mA）	正向 电压 （V）	反向电 压 （V）	反向电 流 （μm）	波长 （nm）	发光 颜色	材料	BT1142	0.1	20	<2.4	>5	<100	645	红	AlGzInP	BT1143	0.1	20	<2.4	>5	<100	656	绿	AlGzInP	BT1144	0.1	20	<2.4	>5	<100	595	黄	AlGzInP	BT1147	0.1	20	<2.4	>5	<100	620	橙	AlGzInP
表 6-12 常用超高亮度单色发光二极管的主要参数																																																														
参数 型号	最大耗 散功率 （W）	最大工 作电流 （mA）	正向 电压 （V）	反向电 压 （V）	反向电 流 （μm）	波长 （nm）	发光 颜色	材料																																																						
BT1142	0.1	20	<2.4	>5	<100	645	红	AlGzInP																																																						
BT1143	0.1	20	<2.4	>5	<100	656	绿	AlGzInP																																																						
BT1144	0.1	20	<2.4	>5	<100	595	黄	AlGzInP																																																						
BT1147	0.1	20	<2.4	>5	<100	620	橙	AlGzInP																																																						

5) 应用	(1) 应用领域	高亮度发光二极管广泛应用在显示屏、电视、交通信号灯、照明、亮化工程等领域，实现重点建筑、景点、商业中心、名胜古迹、桥梁、休闲娱乐场所的照明和美化，也可用于集装饰与广告为一体的商业照明和各种电气及电子设备、仪器等的各种指示灯。
	(2) 实用电路 采用高亮度发光二极管制成的手电筒电路如图 6-39 所示。图中，8 个 LED 并联后接入电源电压为直流 3V 的驱动电路中。图中，LED1~8 是白色高亮度发光二极管，每个管子的工作电流约 20mA。三极管 C1815 的集电极-发射极间的饱和电压为 0.1~0.25V。	<div></div> <p>图 6-39 LED 手电筒的电路原理图</p> <p>接通电源后，3V 直流电压经电感加在 8 个白色高亮度发光二极管 LED1~8 上，二极管被点亮。与此同时，电容 C 开始充电，随着充电的进行，R1 上的电压逐渐降低，致使三极管 A1015 和三极管 C1815 相继导通，8 个 LED 熄灭。R2 限制着两个三极管的电流，保护晶体管不会因过流而烧坏。</p> <p>随着电容 C 充电的进行，两端之间电压上升至接近电源电压，三极管相继关断，LED 又被点亮。电容放电致使两个三极管又相继导通。如此反复，手电筒正常工作。</p>
6) 红外接收二极管的检测	(1) 目测	常见红外接收二极管外观颜色为黑色。识别引脚时，面对受光窗口，左边的为正极，右边的为负极。 红外接收二极管的管体顶端如果有一个小的斜切平面时，通常带有斜切平面一端的引脚为负极，另一端为正极。
	(2) 用万用表	将万用表置于 R×1k 挡，交换红、黑表笔两次测量管子两引脚间的电阻值，正常时，所得阻值应为一大一小。以阻值较小的一次为准，红表笔所接的引脚为负极，黑表笔所接的引脚为正极。
	(3) 检测性能好坏	用万用表电阻挡测量红外接收二极管正反向电阻值的大小，如果两个电阻都很小或都为无穷大，即可判定红外接收二极管已坏，不能使用。

2. 变色发光二极管

变色发光二极管是能变换发光颜色的发光二极管，其内部有两个以上管芯，即在一个管壳内封装两个以上单色的发光二极管管芯。

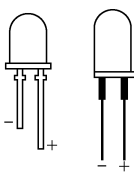
<p>1) 种类</p>	<p>(1) 按可变颜色可分为双色发光二极管、三色发光二极管和多色发光二极管。</p> <p>(2) 按引脚数量可分为二引脚变色发光二极管、三引脚变色发光二极管、四引脚变色发光二极管和六引脚变色发光二极管。</p> <p>常用的变色发光二极管产品系列有 2EF 和 TB 等系列, 如图 6-40 所示。</p>  <p>Figure 6-40 shows several different packages for color change LEDs. On the left, there are two surface-mount packages: one is a small square package with a central pad, and the other is a larger square package with a central pad and four mounting tabs. In the middle, there are two through-hole packages: one is a small cylindrical package with two leads, and the other is a larger cylindrical package with two leads. On the right, there is a large cylindrical package with two leads, and a smaller cylindrical package with two leads.</p>
<p>2) 封装形式</p>	 <p>Figure 6-41 illustrates various packaging forms for color change LEDs. It shows six different configurations: 1) A 2-pin package with a central pad and two leads, labeled +G, C, +R. 2) A 3-pin package with a central pad and three leads, labeled +G, C, +R. 3) A 4-pin package with a central pad and four leads, labeled 1A, 1B, 2B, 3B. 4) A 6-pin package with a central pad and six leads, labeled 1, 2, 3, 4, 5, 6. 5) A 4-pin package with a central pad and four leads, labeled R, G, C. 6) A 4-pin package with a central pad and four leads, labeled R, G, C.</p>
<p>3) 内部电路</p>	<p>图 6-41 变色发光二极管的封装形</p> <p>变色发光二极管有二引脚、三引脚、四引脚和六引脚等几种封装形式, 如图 6-41 所示。图中, R—表示红色; G—表示绿色; C—表示公共引脚。其他标注见图 6-42。</p> <p>各类变色发光二极管的规格不同, 型号不同, 内部连接也各异。在图 6-42 中, (a) 为六引脚变色二极管的内部电路, 是一对双色发光二极管, 每一只双色二极管都是两只发光二极管的共阴极连接而成; (b) 是四引脚变色二极管的内部电路, 三只发光二极管通常是红、绿、蓝单色二极管, 采用共阴极(或共阳极)连接方式; (c)、(d) 和 (f) 都是三引脚双色发光二极管, 其连接方式依次是共阴极、共阳极和串联; (e) 是两引脚双色发光二极管的内部电路, 两只单色二极管采用反并联连接方式。</p>

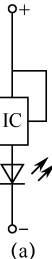
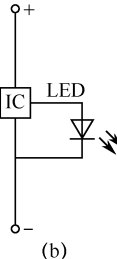
<p>3) 内部电路</p>	<div><p>(a)六引脚变色二极管内部连接</p><p>(b)四引脚变色二极管的内部电路</p><p>(c)三引脚共阴极连接</p><p>(d)三引脚共阳极连接</p><p>(e)二引脚反并联连接</p><p>(f)三引脚串联连接</p><p>图 6-42 常用变色发光二极管的内部连接</p></div>
<p>4) 工作原理</p>	<p>(1) 二引脚变色发光二极管：管内部的两只管芯反向并联，发光颜色通常为红色和绿色，两个引脚一般用数字或字母标记。当两引脚间加正向电压时发出红色光；加反向电压时发出绿色光；如在两引脚间加交变电压时，红、绿色光交替闪亮，但由于人眼视觉残留作用，当闪烁周期小于 0.1s 时看到的是橙色光。</p> <p>(2) 三引脚变色发光二极管：内部的两个管芯作共阳极连接或共阴极连接，有三个引脚。左右两边的引脚分别为两个单色发光二极管的阳极（或阴极），可用数字 1、3（或字母 R、G）表示；中间的引脚为公共阴极（或阳极），用数字 2（或字母 C）表示。当在引脚 1（或 R）、2（或 C）间加正向电压（或负向电压）时，二极管导通、发出红色光；在引脚 3（或 G）、2（或 C）间加正向电压（或负电压）时，二极管导通、发出绿色光；当 1（或 R）、3（或 G）对 2（或 C）同时加正或负电压时，二极管发出红色、绿色的混合光，呈现橙色。</p> <p>当三引脚变色发光二极管内的两个发不同颜色管芯串联时，两管芯的连接处引出一个引脚，如图 2-42（f）所示。如果 1、2 引脚间加正向电压，管子导通发出红色光，2、3 两端加正向电压时就会发出绿色光。</p> <p>(3) 四引脚变色发光二极管：这种发光二极管是将三种不同颜色的管芯封装在一个管壳内制成的。其连接方式分为共阴极和共阳极两种。常用的四引脚发光二极管有 2EF302、2EF312、2EF322 等型号。采用共阴极连接时，一般三种发光颜色（如红、蓝、绿）的管芯负极连接在一起，引出一个引脚作为公共阴极，另外三个引脚通常依次为绿色发光二极管的正极、蓝色发光二极管的正极、红色发光二极管的正极。使用时公共负</p>

4)工作原理	极接地，其他引脚按需要接入工作电源。																																																																																			
	例如，型号为 5050 的红蓝绿三色贴片 LED 发光二极管的工作电压范围分别是红色（1.8~2.0V）、蓝色（3.0~3.4V）、绿色（3.0~3.4V），工作电流约为 60mA，每个管芯的电流约为 20mA。																																																																																			
	（4）六引脚发光二极管：这种管内部封装四只发光管，分为两组，每组就是一个三引脚的变色发光二极管。																																																																																			
5) 技术参数	常见双色发光二极管的主要参数见表 6-13 和表 6-14。																																																																																			
	表 6-13 三种双色发光二极管的主要参数																																																																																			
	<table><tr><th>参数 型号</th><th>耗散 功率(W)</th><th>正向 电压(V)</th><th>反向 电压(V)</th><th>正向电流 (mA)</th><th>反向电流 (μA)</th><th>发光颜色</th><th>材料</th></tr><tr><td>BT205（双色）</td><td>0.09</td><td><2.5</td><td>>5</td><td>40</td><td>≤50</td><td>红、绿</td><td>GiaP</td></tr><tr><td>BT315（双色）</td><td>0.09</td><td><2.5</td><td>>5</td><td>40</td><td>≤50</td><td>红、绿</td><td>GiaP/GaAsP</td></tr><tr><td>BT315A（双色）</td><td>0.1</td><td><2.5</td><td>>5</td><td>40</td><td>≤100</td><td>红、绿</td><td>GiaP/GaAsP</td></tr></table>	参数 型号	耗散 功率(W)	正向 电压(V)	反向 电压(V)	正向电流 (mA)	反向电流 (μA)	发光颜色	材料	BT205（双色）	0.09	<2.5	>5	40	≤50	红、绿	GiaP	BT315（双色）	0.09	<2.5	>5	40	≤50	红、绿	GiaP/GaAsP	BT315A（双色）	0.1	<2.5	>5	40	≤100	红、绿	GiaP/GaAsP																																																			
	参数 型号	耗散 功率(W)	正向 电压(V)	反向 电压(V)	正向电流 (mA)	反向电流 (μA)	发光颜色	材料																																																																												
	BT205（双色）	0.09	<2.5	>5	40	≤50	红、绿	GiaP																																																																												
BT315（双色）	0.09	<2.5	>5	40	≤50	红、绿	GiaP/GaAsP																																																																													
BT315A（双色）	0.1	<2.5	>5	40	≤100	红、绿	GiaP/GaAsP																																																																													
表 6-14 常见 2EF 系列变色发光管的主要技术参数																																																																																				
<table><tr><th>参数 型号</th><th>正向电压 (V)</th><th>最大工作电流 (mA)</th><th>反向电流 (μA)</th><th>发光颜色</th><th>波长 (nm)</th><th>封闭形式与外形</th></tr><tr><td>2EF102</td><td>2</td><td>50</td><td>≤50</td><td>红</td><td>700</td><td>全塑，圆形 ϕ5mm</td></tr><tr><td>2EF112</td><td>2</td><td>20</td><td>≤50</td><td>红</td><td>700</td><td>全塑，圆形 ϕ3mm</td></tr><tr><td>2EF205</td><td>2.5</td><td>40</td><td>≤50</td><td>绿</td><td>656</td><td>全塑，圆形 ϕ5mm</td></tr><tr><td>2EF215</td><td>2.5</td><td>20</td><td>≤50</td><td>绿</td><td>656</td><td>全塑，圆形 ϕ3mm</td></tr><tr><td>2EF225</td><td>2.5</td><td>40</td><td>≤50</td><td>绿</td><td>656</td><td>全塑，2×5×8.5（mm）</td></tr><tr><td>2EF125</td><td>2.5</td><td>40</td><td>≤50</td><td>红</td><td>700</td><td>全塑，1×5×8.5（mm）</td></tr><tr><td>2EF125A</td><td>2.5</td><td>20</td><td>≤50</td><td>红</td><td>700</td><td>全塑 1×5×8.5（mm）</td></tr><tr><td>2EF135</td><td>2.5</td><td>20</td><td>≤50</td><td>红</td><td>700</td><td>全塑，2-2×2（mm）</td></tr><tr><td>2EF165</td><td>2.5</td><td>20</td><td>≤50</td><td>红</td><td>700</td><td>全塑，三角形 2.8×4.5（mm）</td></tr><tr><td>2EF265</td><td>2.5</td><td>20</td><td>≤50</td><td>绿</td><td>656</td><td>全塑，2.8×4.5（mm）</td></tr><tr><td>2EF285</td><td>2.5</td><td>40</td><td>≤50</td><td>绿</td><td>656</td><td>全塑，2.8×4.5（mm）</td></tr></table>	参数 型号	正向电压 (V)	最大工作电流 (mA)	反向电流 (μA)	发光颜色	波长 (nm)	封闭形式与外形	2EF102	2	50	≤50	红	700	全塑，圆形 ϕ5mm	2EF112	2	20	≤50	红	700	全塑，圆形 ϕ3mm	2EF205	2.5	40	≤50	绿	656	全塑，圆形 ϕ5mm	2EF215	2.5	20	≤50	绿	656	全塑，圆形 ϕ3mm	2EF225	2.5	40	≤50	绿	656	全塑，2×5×8.5（mm）	2EF125	2.5	40	≤50	红	700	全塑，1×5×8.5（mm）	2EF125A	2.5	20	≤50	红	700	全塑 1×5×8.5（mm）	2EF135	2.5	20	≤50	红	700	全塑，2-2×2（mm）	2EF165	2.5	20	≤50	红	700	全塑，三角形 2.8×4.5（mm）	2EF265	2.5	20	≤50	绿	656	全塑，2.8×4.5（mm）	2EF285	2.5	40	≤50	绿	656	全塑，2.8×4.5（mm）
参数 型号	正向电压 (V)	最大工作电流 (mA)	反向电流 (μA)	发光颜色	波长 (nm)	封闭形式与外形																																																																														
2EF102	2	50	≤50	红	700	全塑，圆形 ϕ5mm																																																																														
2EF112	2	20	≤50	红	700	全塑，圆形 ϕ3mm																																																																														
2EF205	2.5	40	≤50	绿	656	全塑，圆形 ϕ5mm																																																																														
2EF215	2.5	20	≤50	绿	656	全塑，圆形 ϕ3mm																																																																														
2EF225	2.5	40	≤50	绿	656	全塑，2×5×8.5（mm）																																																																														
2EF125	2.5	40	≤50	红	700	全塑，1×5×8.5（mm）																																																																														
2EF125A	2.5	20	≤50	红	700	全塑 1×5×8.5（mm）																																																																														
2EF135	2.5	20	≤50	红	700	全塑，2-2×2（mm）																																																																														
2EF165	2.5	20	≤50	红	700	全塑，三角形 2.8×4.5（mm）																																																																														
2EF265	2.5	20	≤50	绿	656	全塑，2.8×4.5（mm）																																																																														
2EF285	2.5	40	≤50	绿	656	全塑，2.8×4.5（mm）																																																																														

3. 闪烁发光二极管

闪烁发光二极管（又称自闪烁发光二极管）是一种由集成电路和发光二极管组成的特殊发光器件。管内封装了分别发红光与发绿光的两个管芯和已设定程序的控制电路，只要接上工作电源，就能以闪烁方式自动发光。

1)外部形状	<p>闪烁发光二极管的外部形状如图 6-43 所示。</p>  <p>图 6-43 闪烁发光二极管外部形状</p>
--------	--

2) 内部电路	<p>闪烁发光二极管的外部形状与普通发光二极管相似，但从侧面可看到管芯上还有一条短黑带。闪烁发光二极管内部的集成电路含有振荡器、分频器和缓冲驱动器等。</p> <p>闪烁发光二极管的内部电路如图 6-44（a）所示；发光二极管同集成电路的连接方式如图 6-44（b）所示。</p> <div><div></div><div></div></div> <p>图 6-44 闪烁发光二极管的内部连接</p>																																			
3) 技术参数	<p>四种国产闪烁发光二极管的主要技术参数见表 6-15。</p> <table><caption>表 6-15 四种国产闪烁发光二极管的主要技术参数</caption><thead><tr><th>参 数 值 参 数 名 称 型 号</th><th>工作电压 U_{DD}（V）</th><th>工作电流 I（mA）</th><th>闪烁频率 f（Hz）</th><th>开关占空比 D（%）</th><th>发光强度 I_O（mcd）</th><th>发光颜色</th></tr></thead><tbody><tr><td>BTS11405</td><td>5</td><td>≤ 35</td><td>1.3~5.2</td><td>33~67</td><td>≥ 0.8</td><td>红</td></tr><tr><td>BTS12405</td><td>5</td><td>≤ 35</td><td>1.3~5.2</td><td>33~67</td><td>≥ 1.0</td><td>橙</td></tr><tr><td>BTS33405</td><td>5</td><td>≤ 35</td><td>1.3~5.2</td><td>33~67</td><td>≥ 0.8</td><td>黄</td></tr><tr><td>BTS34405</td><td>5</td><td>≤ 35</td><td>1.3~5.2</td><td>33~67</td><td>≥ 1.0</td><td>绿</td></tr></tbody></table>	参 数 值 参 数 名 称 型 号	工作电压 U_{DD} （V）	工作电流 I （mA）	闪烁频率 f （Hz）	开关占空比 D （%）	发光强度 I_O （mcd）	发光颜色	BTS11405	5	≤ 35	1.3~5.2	33~67	≥ 0.8	红	BTS12405	5	≤ 35	1.3~5.2	33~67	≥ 1.0	橙	BTS33405	5	≤ 35	1.3~5.2	33~67	≥ 0.8	黄	BTS34405	5	≤ 35	1.3~5.2	33~67	≥ 1.0	绿
参 数 值 参 数 名 称 型 号	工作电压 U_{DD} （V）	工作电流 I （mA）	闪烁频率 f （Hz）	开关占空比 D （%）	发光强度 I_O （mcd）	发光颜色																														
BTS11405	5	≤ 35	1.3~5.2	33~67	≥ 0.8	红																														
BTS12405	5	≤ 35	1.3~5.2	33~67	≥ 1.0	橙																														
BTS33405	5	≤ 35	1.3~5.2	33~67	≥ 0.8	黄																														
BTS34405	5	≤ 35	1.3~5.2	33~67	≥ 1.0	绿																														
4) 应用	<p>（1）应用领域。</p> <p>闪光二极管具有寿命长、功耗低、接线简单、使用方便等特点。广泛用作温度、压力、液位等各种越限指示与报警，也可制作景观美化、节日彩灯、电子胸花等。</p>																																			
	<p>（2）应用注意事项。</p> <p>要确保工作电压的变化在允许波动范围内，电压太低会发光较暗，电压过高会损坏器件，一般使用的工作电压是 5V。</p> <p>连接时要分清正负极，不允许接反。一般长引脚为正极，短引脚为负极。</p> <p>闪烁发光二极管的安装位置要尽量远离发热元器件。</p> <p>管子引脚不能承受应力，引脚根部不许弯曲，焊接点尽量远离管子根部。</p>																																			

4. 电压控制型发光二极管

电压控制型发光二极管（也称压控发光二极管）是将发光二极管和限流电阻串联并封装在一个管壳内，引出两个引脚（即电极），长引脚为正极，短引脚为负极。只要外加额定电压，即可正常发光。

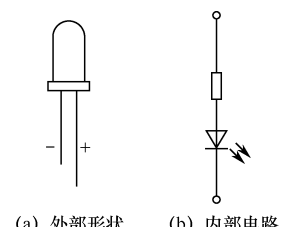
1) 外部形状和内部电路	<p>电压控制发光二极管的外部形状和内部电路如图 6-45 所示。</p> <div></div>
--------------	--

图 6-45 压控发光管的外部形状和内部电路

2) 主要参数	电压控制型发光二极管的发光颜色有红、黄、绿等，工作电压有 5V、9V、12V、18V、24V 等规格。常见电压控制发光二极管的主要技术参数见表 6-16。							
	表 6-16 常见 BTV 系列电压控制发光二极管的主要参数							
	典型值 参数名称 型号	工作电压 U (V)	耗散功率 p (mA)	发光强度 I (mcd)	峰值波长 λ_P (nm)	反向电压 U_R (V)	正向工作电流 I_P (mA)	发光颜色
	BTV314055	5	100	2	700	≥ 5	15	红
	BTV334059	9	100	2	585	≥ 5	10	黄
	BTV344052	12	120	2	565	≥ 5	10	绿
	BTV314051	15	150	2	700	≥ 5	10	红
	BTV314058	18	180	2	700	≥ 5	10	红
	BTV314054	24	240	2	700	≥ 5	10	红

5. 有机发光二极管

有机发光二极管（简称 OLED）的两电极为有机发光层，当正负极的带电粒子在有机材料中复合时就会发光。聚合物发光二极管（OELD）也属于有机发光二极管一类。

1) 结构	<p>有机发光二极管是一种薄膜多层器件。它主要由金属箔、薄膜或平板平台、电极层、活性物质层、反电极层、保护层等构成，其中至少有一个透明的电极。</p> <p>典型 PMOLED 是由玻璃基板、ITO（铟锡氧化锡铟）阳极、有机发光层和阴极等所组成。其中，薄而透明的 ITO 阳极与金属阴极如同三明治般地将有机发光层包夹其中。</p>
2) 工作原理	<p>OLED 是利用有机半导体材料和发光材料在电场驱动下载流子注入和复合导致发光的现象制作成的。二极管的阳极和阴极分别为锡氧化铟透明电极和金属电极。</p> <p>在外加电压的驱动下，电子和空穴分别从阴极和阳极注入传输层，然后经过传输层迁移到发光层，并在发光层中相遇、复合而发出光。金属电极兼有反射层的作用。</p> <p>采用不同的半导体材料可产生红、绿和蓝（RGB）三原色，构成基本色彩。</p>
3) 发光方式	<p>OLED 发光方式有主动式和被动式两种。在被动方式下，只有为行、列地址选中的发光元被点亮；在主动方式下，OLED 发光元被专用薄膜晶体管驱动而点亮。</p>
4) OLED 彩色化方式	<p>（1）三色发光结构运用不同材料的发光管芯，对 RGB（红绿蓝）三色进行排列，具有发光效率佳的特性，但色彩的精细度较差。</p> <p>（2）色变换结构方式是以蓝色发光材料进行发光，发光时中间隔有一层薄膜，发光效率不如三色发光结构方式。</p> <p>（3）彩色滤光片是以白光发光材料进行发光，中间加有一层彩色滤光片，发光效率也低于三色发光结构方式。</p>

<div>5) 性能特点</div>	<div>(1) OLED 的厚度可小于 1mm，重量更轻。</div> <div>(2) 高亮度、高发光效率。</div> <div>(3) 发光材料有多种，易实现彩色显示；且色彩好，字体清晰，画质均匀。</div> <div>(4) 响应速度一般小于 10ms，显示的动态画面质量高。</div> <div>(5) 工作温度范围广，对环境适应能力较强，在-40℃仍能正常显示。</div> <div>(6) 能够在不同材质的基板上制造，能弯曲，适用性好。</div> <div>(7) 耗电省、效率高，操作电压低一般在 2~10V 之间。</div> <div>(8) 是固态显示器件，没有液体物质，抗震性能更好，不怕摔。</div> <div>(9) 可视角度足够大，画面不失真。</div> <div>(10) 工艺简单，成本低。</div>
<div>6) 分类</div> <div>OLED 通常分为无源矩阵 OLED、有源矩阵 OLED、透明 OLED、顶部发光 OLED、可折叠 OLED、白光 OLED 等几类。每一种 OLED 都有其独特的用途。</div>	<div>(1) 无源矩阵 OLED（简称为 PMOLED）</div> <div>PMOLED 是用阴极条、阳极条相互垂直的方式构成矩阵，阴极与阳极的交叉点称为像素（即发光元）。以扫描方式点亮阵列中的发光元，每个发光元都控制在短脉冲模式下，为瞬间高亮度发光元。发光元的亮度与通过电流的大小成正比。</div> <div>PMOLED 通常采用动态驱动方式。如果将发光元分为 N 行和 M 列，就需要 N 个行电极和 M 个列电极。行和列分别对应发光元的两个电极，即阴极和阳极。</div> <div>在实际应用电路中，要逐行点亮或者要逐列点亮发光元，通常采用逐行扫描的方式，读取各列数据。</div> <div>PMOLED 显示屏结构简单，制造容易，但驱动电压较高；用于文本和图标显示时效率最高；主要适用于移动电话、掌上电脑、MP3 播放器等需要的小屏幕等，不适合大尺寸与高分辨率面板使用。</div> <div>(2) 有源矩阵 OLED（简称 AMOLED）</div> <div>AMOLED 具有完整的阴极层、有机分子层及阳极层。阳极层覆盖着薄膜晶体管（TFT）矩阵。TFT 矩阵可控制每个发光元，每个发光元都可以连续、独立地被驱动和发光。</div> <div>AMOLED 一般采用静态驱动方式。各有机电致发光元的阴极是连在一起引出的，而阳极是独立引出的，即共阴极连接。只要让恒流源的电压与阴极的电压之差大于发光元的启动电压，发光元就能在恒流源的驱动下发光。</div> <div>静态驱动具有存储效应，可进行 100%负载驱动；驱动不受扫描电极数的限制，易实现高亮度和高分辨率；可对红色和蓝色发光元独立进行灰度调节驱动，有利于 OLED 彩色化实现；驱动电路藏于显示屏内，易于实现集成和小型化，提高了成品率和可靠性。</div> <div>AMOLED 具有驱动电压低、发光元寿命长、耗电省、刷新率高等优点，但成本高，制作工艺复杂，主要适合用于大型显示屏、电视、显示器及电子告示牌等。</div> <div>(3) 透明 OLED</div> <div>透明 OLED 是用透明的基层、阳极、阴极等构成。不发光时的透明度最高可达基层透明度的 85%。当透明 OLED 通电时，光线可以双向通过。</div> <div>透明 OLED 显示器既可采用无源矩阵结构，也可采用有源矩阵结构。</div> <div>(4) 顶部发光 OLED</div> <div>顶部发光 OLED 使用不透明或反射性的基层，最适于采用有源（即主动）矩阵形式。其在智能卡中广为应用。</div>

6) 分类 OLED 通常分为无源矩阵 OLED、有源矩阵 OLED、透明 OLED、顶部发光 OLED、可折叠 OLED、白光 OLED 等几类。每一种 OLED 都有其独特的用途。	(5) 可折叠 OLED 可折叠 OLED 的基层是由很柔韧的金属箔或塑料制成。它重量轻，柔韧耐用，可广泛用于移动电话、掌上电脑、“智能”服装等。
	(6) 白光 OLED 白光 OLED 发出的白光在亮度、均衡度和能效方面都要高于日光灯发出的白光，且具备白炽灯照明的真彩特性，在家庭、建筑物、道路等照明中的应用越来越广。 由于有机电致发光二极管具有自发光特性、不需背光源、对比度高、厚度薄、视角广、反应速度快、可用于挠曲性面板、使用温度范围广、构造及制程较简单等优异特性，被认为是下一代平面显示器的新兴应用技术。

6. 纳米晶体发光二极管

将半导体材料制造成微小的纳米晶体，这类晶体称为量子点，调整其尺寸就能改变发光的颜色。虽制造工艺复杂，但它具有优异的性能，正常工作温度可达 250℃，击穿特性更陡，开关速度更快，反向漏电流更小。

6.3.7 发光二极管的封装

应用在不同领域、不同场合的 LED 对发光效率、光色、出光角度、光强分布等要求也不同。改进和创新 LED 的封装结构、材料、形状、尺寸、工艺等可以制造出多系列、多品种、多规格的适用产品。

1. 封装形式

1) 引脚式封装	品种繁多的 LED 多采用引脚式封装。
2) 模组封装	模组封装就是在较小基板上高密度封装几十甚至几百个 LED 管芯，管芯采用串联、并联及其组合形式，以制造大功率 LED 及各种 LED 显示及照明产品。但这种封装密度高，工作时产生的热量较大，需要重视散热问题。
3) 控制芯片与管芯组合封装	闪烁发光二极管是将预装控制程序的集成电路与 LED 管芯组合封装在一起，通电后可以产生闪烁发光，有较强视觉冲击。
4) 双色管芯封装	将两种不同发光颜色（一般是红色和绿色）的管芯组合、封装在一个管壳中，组成变色显示器件；还可获得第三种混合色。
5) 恒流源芯片与管芯组合封装	它是将多个 LED 管芯黏结在微型印制电路板上，加盖塑料反射罩并用环氧树脂灌封而成的，其引线排列和连接方式有双列直插和单列直插等形式，有数百种封装外形与尺寸。
6) 环氧树脂高温固化	对于有色透明、无色透明、有色散射和无色散射的透镜封装，可采用环氧树脂高温固化，制成多种外形各异、尺寸不同的发光二极管。

2. 表面贴装（SMD）封装

贴装 LED 多采用带透明塑料体的 SOT-23 改进型封装，卷盘式编带包装。带透镜的 SMD 的 SLM-125 系列产品为单色发光二极管，SLM-245 系列产品为双色或三色发光二极管。

3. 载体封装

超高亮度和功率型 LED 产品可采用 PLCC-2 （塑封带引线片式载体）封装。

4. 功率 LED 封装

功率 LED 是将功率型管芯焊接在载体上，然后将载体及散热器一并装入管壳、固定引脚引线后进行封装。这种封装有利于提高发光效率，散热性也好。

功率 LED 的封装也可以用六角形铝板作为底座的多管芯组合，铝板同时作为散热器。管芯的引线通过底座上制作的两个接触点与正负极连接，根据输出光功率的大小来确定底座上管芯的数目。这种封装的二极管发射的光可为单色、彩色或白色。

6.3.8 LED 显示器

1. LED 数码管

LED 数码管是由多个发光二极管管芯封装在一起组成数字“8”或字符等的器件，各发光管间的连接已在内部完成。发光管的颜色有红、绿、蓝、黄等几种，广泛用于仪器仪表、时钟、车站、银行等场合，如图 6-46 所示。




图 6-46 数码管

2. 数码显示样式

常用 LED 数码管显示的数字和字符是 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F、G、H、I、J，其显示样式如图 6-47 所示。

0		A	
1		B	
2		C	
3		D	
4		E	
5		F	
6		G	
7		H	
8		I	
9		J	

图 6-47 字符显示样式

3. 类型

(1) 按内部连接可分为共阴极和共阳极两类。内部各发光二极管的阳极连接到一起的称为共阳极数码管，阴极连接到一起的称为共阴极数码管。
(2) 按位数可分为 1、2、3、4、5、6、7、8、10 等；但也有 3 位半和 4 位半的，多用在仪表上。
(3) 按显示内容可分为数字、字母、米字、符号、矩阵等。显示一位字符的是数码管，显示两位以上为显示器。
(4) 按封装结构可分为反射罩式、单片集成式、单条七段式、光柱式等多种。
(5) 按颜色可分为红、绿、蓝、黄等。

4. 结构

LED 数码管的典型结构如图 6-48 所示。数码管内部一般由七个显示段和一个小数点构成。七个显示段分别用字母 A、B、C、D、E、F、G 表示，小数点用 DP 表示。

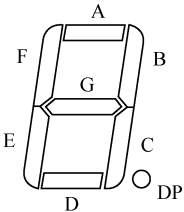


图 6-48 数码管的典型结构

5. 内部连接及引脚定义

1) 内部连接	<p>共阳极和共阴极数码管的内部连接如图 6-49 所示。图中，DP 为小数点，各个字母对应的显示字段与图 6-48 相对应。</p> <div><div><div>A B C D E F G DP</div><div></div><div>公共阳极</div><div>(a) 共阳极连接</div></div><div><div>A B C D E F G DP</div><div></div><div>公共阴极</div><div>(b) 共阴极连接</div></div></div> <p>图 6-49 常用数码管的内部连接</p>
2) 引脚排列及定义	<p>(1) 典型排列及定义：常用数码管的引脚排列及定义如图 6-50 所示。图中，引脚 3 和 8 是公共引脚，在内部是连接在一起的，是同一引脚的两根引线。在实用电路中，共阴极连接数码管的 3、8 引脚接地（即电源地）；共阳极数码管的 3、8 引脚接电源正极（一般为 5V）。</p>

2)引脚排列及定义

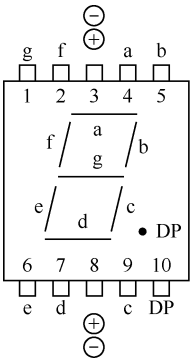


图 6-50 数码管的引脚排列及定义

(2) 4 位显示器的引脚及定义：对于 4 位数码显示器，引脚排列及定义如图 6-51 所示。这是一个四位、七段、带小数点、12 引脚的 LED 显示器，每一笔画对应一个字母，DP 是小数点；A1、A2、A3、A4 是位选线，分别与四个数码管相连，以确定相应位是否显示，显示的具体内容由 a、b、c、d、e、f、g 决定。

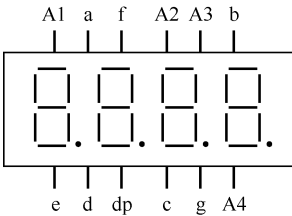


图 6-51 四位 LED 的引脚排列及定义

6. 驱动方式

LED 数码管的正常显示需要用驱动电路来驱动数码管的各个段码，其驱动方式可以分为静态驱动和动态驱动两类。

- (1) 静态驱动：静态驱动（即直流驱动）是指每个数码管的每个段都有相应的驱动电路，驱动信号可以来自译码器输出，也可来自单片机的输出。静态驱动的优点是简单、显示亮度高。
- (2) 动态驱动：LED 显示器的动态驱动是将所有数码管的 8 个显示段（即笔画）a、b、c、d、e、f、g、dp 的同名端连在一起接一个驱动线；每个数码管的公共极接选通控制电路。这种驱动方式多采用单片机控制。通过分时轮流控制各个数码管的公共极，使各个数码管轮流显示；利用视觉的暂留现象及发光二极管的余晖效应，只要轮流的速度足够快，看到的就是一组稳定的显示数据。动态显示效果和静态显示基本相同，但能够节省大量驱动端口，且功耗更低。

7. 显示棒

LED 显示棒是一种利用人的视觉暂留效应和发光管余晖现象制成的智能玩具。在静止时，它只是一些特意排列的发光二极管；当用一定速度摇摆时，会随位置的变化而变化，发光管或亮或灭，显现出图案、汉字或字符串等。

1) 构成

显示棒多由单片机控制模块、显示模块、电源模块、开关模块和存储器等组成，如图 6-52 所示。

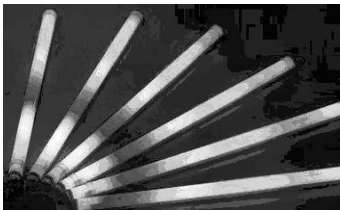


图 6-52 LED 显示棒

2) 分类

- (1) 按控制方式：可分为内控式（即内部有单片机，通电自动运行）和外控式（需要外接控制器）。
- (2) 按内部可控性：可分为 1 米 6 段、1 米 8 段、1 米 12 段、1 米 16 段、1 米 32 段几种。具体含义就是 1 米长的管子内有几段显示是可以独立受控的；1 米内段数越多，显示效果越好。
- (3) 按 LED 数量：可分为 1 米 96 只灯、有 1 米 144 只灯等，灯数越多，显示效果越好。
- (4) 按供电：可分为高压供电（直接 220V 供电）和低压供电（12V 供电，220V 电源需要加开关电源转换）。低压供电比较可靠、稳定，高压供电简单、直接，但容易烧坏。

6.3.9 LED 显示屏

1. 常见 LED 显示屏

LED 显示屏（见图 6-53）是集光电技术、控制技术、计算机技术和视频技术为一体的高科技产品，其发光部分是光发二极管，具有效果好、耗电少、亮度高、工作电压低、寿命长等优点。



图 6-53 LED 显示屏

2. LED 显示屏的分类

1) 按使用环境	<p>(1) 户内型：户内型显示屏面积最大十几个平方米，点密度较高，在无阳光直射环境下运行，显示屏体一般无密封和防水能力。</p> <p>(2) 户外型：户外型显示屏面积可大到上百平方米，点密度较稀，发光亮度高，可在阳光直射条件下使用，屏体具有良好的防风雨、防雷电、防冰雪和耐热、抗寒能力。</p> <p>(3) 半户外型：半户外型显示屏介于户外屏和户内屏之间，亮度较高，可在户外、无阳光直射、无冰雪的位置使用。显示屏体需要密封，具有一定的防风雨、抗寒暑能力。</p>
2) 按显示颜色	<p>可分为单色、红绿双色、红绿蓝三色、全彩、自然色显示屏（含伪彩色 LED 显示屏）。</p>

3) 按灰度级	可分为 16、32、64、128、256 级灰度显示屏。
4) 按功能	可分为图文显示屏、多媒体视频显示屏、行情显示屏、条形显示屏、利率显示屏、文本显示屏、球赛显示屏、计算机视频 LED 显示屏、电视视频 LED 显示屏等。行情显示屏一般包括证券、利率、期货、列车时刻表等。

3. OLED 显示屏

1) 组成	<p>(1) 基层：基层通常由透明塑料、玻璃、金属箔等材料制成，用来支撑整个 OLED。</p> <p>(2) 阳极和阴极：实用时阳极接电源正极，阴极接电源负极。</p> <p>(3) 有机层：该层是用有机物分子材料或有机聚合物构成的。</p> <p>(4) 导电层：导电层是由有机塑料分子构成的，主要作用是传输来自阳极的空穴。</p> <p>(5) 发射层：发射层由不同于导电层的有机塑料分子构成，主要作用是传输来自阴极的自由电子。发光过程在这一层完成。</p>
2) 性能特点	<p>(1) 能耗低：显示屏很薄，重量轻，能耗低，节能显著。</p> <p>(2) 驱动电压低：可与太阳能电池、集成电路等相配接。</p> <p>(3) 适应性广：采用玻璃衬底可实现大面积平板显示，用柔性材料做衬底，能制成可折叠的显示器，可适应不同的需要。</p> <p>(4) 抗震、耐寒：由于 OLED 是全固态器件，具有抗震、耐低温（-40℃）等特性，可在较恶劣环境下应用，如用作坦克、飞机等的显示终端。</p> <p>(5) 图像清晰：显示器是主动发光、视角范围大、响应速度快、图像稳定清晰、亮度高、色彩丰富、分辨率高。</p>

4. 显示屏控制

LED 显示屏都是由计算机控制的，控制系统通常由主控子系统、扫描子系统、显示控制与驱动子系统三大部分组成。

主控子系统对指令和收集的数据进行分析处理后发送各像素的控制信号给显示控制与驱动子系统。控制信号通常有两种，一种是用 0 和 1 构成的开关信号，控制 LED 的灭与亮；另一种是串行的 8 位二进制数的亮度值，即为 256 级的灰度值。

显示控制与驱动子系统接收主控子系统的命令后，按预定程序送到并刷新显示屏。

扫描子系统主要是收集显示屏上 LED 阵列中各行列上 LED 的信息并传送给主控子系统。

5. 显示屏的检测

1) 外观	显示屏要牢固，外框无明显划痕，平面平整、美观。像素管的安装一致、整齐、无松动及管壳破裂现象。
2) 结构	显示屏框架可采用钢、铝、木等材料制造，但结构要坚固、合理。
3) 色泽均匀	显示屏由众多 LED 组成，各 LED 的外观及性能要一致，整屏的亮度要均衡，无明显色块。
4) 设备安全性	显示屏安装要牢固，确保安全，杜绝安全隐患，尤其是户外安装，要经得起风吹雨打。
5) 人身安全	显示屏周围人往往很多，要确保人身安全，地漏电流不得超过 3.5mA。

6.3.10 发光二极管的驱动电路

常用的发光二极管驱动电路主要有直流驱动电路、线性驱动电路、背光驱动电路、交流驱动电路等。

LED 的亮度是随工作电流的大小而改变的, 采用恒流源驱动可以更好地控制亮度。高亮度、超高亮度 LED 通常都采用恒流源驱动。LED 的工作电流最大可达 1A, 而反向击穿电压 (U_F) 通常为 2~4V。

1. 直流驱动电路

当 LED 用作电源、工作状态或报警指示灯时, 多采用直流驱动电路。

LED 的典型直流驱动电路如图 6-54 所示。

在实用电路中要串接限流电阻以保护发光管不被损坏。电阻器阻值大小取决于使用的电源电压和 LED 所需的工作电流。发光二极管的正向压降一般为 1.5~2.0V, 工作电流一般取 10~20mA。

图 6-54 (a) 是用电池组驱动, 电路中的 R 为限流电阻; 图 6-54 (b) 是用 TTL 电路进行驱动, V_{CC} 是工作电压, 一般为 5V; 图 6-54 (c) 是用 CMOS 电路进行驱动, R 为基极电阻, 其阻值决定晶体管 VT 基极电流的大小, 同时也确定了 LED 的工作电流的大小。当工作电压 V_{DD} 过高时需要串接电阻以保护电路安全运行。

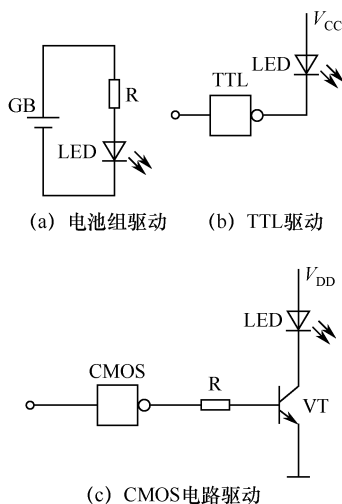


图 6-54 典型直流驱动电路

2. 线性驱动电路

LED 线性驱动电路的核心是利用工作于线性区的功率三极管或作为动态可调电阻来控制负载。线性驱动电路有并联型和串联型两种形式。

1) 并联型驱动电路

并联型驱动电路如图 6-55 所示, LED 与三极管 VT 并联。

当输入电压 U_{in} 增大或者 LED 个数减少时, R_1 中的电流和电压降都会变大, 分流调节器 (即 VT) 的电流也随着增大, 限流电阻 R 中的电流和压降也变大, 从而使 LED 的电流基本

保持恒定。

在这个电路中，由于串联的限流电阻 R 的存在，增加了消耗，降低了电路效率，在输入电压变化范围较大时很难保持 LED 中电流恒定。

2) 串联型驱动电路

串联驱动电路如图 6-56 所示，串联在一起的多个 LED 和三极管 VT 串联，VT 工作在放大状态。

当输入电压增大时，LED 中的电流增大，电阻 R 上的压降也增加，三极管 VT 的基极电流减小，致使 VT 上的压降增大，从而保持 LED 上的电压和电流基本恒定。

功率三极管 VT 有一个导通电压，所以输入的最小电压必须大于 VT 的导通电压与负载电压之和，电路才能正确地工作。

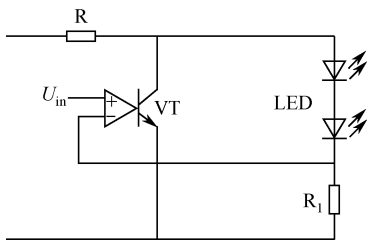


图 6-55 并联型驱动电路

图中，LED 组是多个 LED 的串联

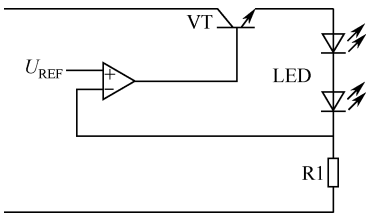


图 6-56 串联型驱动电路

3. 背光驱动电路

背光驱动电路如图 6-57 所示。

当 VT_2 工作时，调节基极电阻 R_2 使 VT_2 的电流达到额定值。LED 通电、发光。

当 LED 中的电流增大时， R 上的压降增大，三极管 VT_1 导通，使 VT_2 的基极电位和电流变小，反馈电阻 R 上的电压降也减小，以此控制流过 LED 的电流达到基本恒定。

4. 交流驱动（即电容降压驱动）电路

交流驱动电路如图 6-58 所示。

当采用交流驱动时，发光二极管接成反并联形式，图中 R_1 、 C_1 组成降压电路，电阻 R 为限流电阻，保护发光二极管免遭损坏。

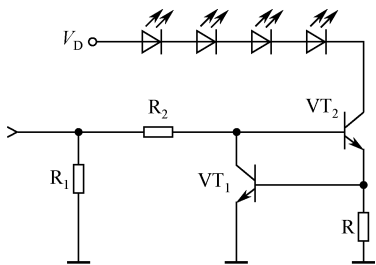


图 6-57 背光驱动电路

图中， V_D 为背光工作直流电压，三极管 VT_1 、

VT_2 皆工作在放大状态

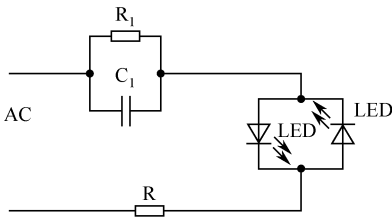


图 6-58 交流驱动电路

6.3.11 应用与检测

1. 发光二极管的应用

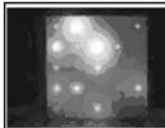
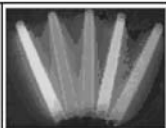
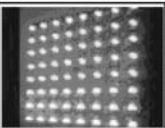


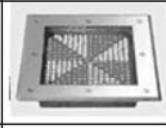


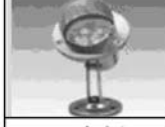

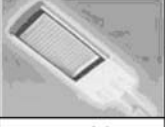

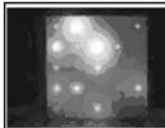
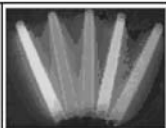
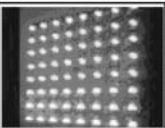


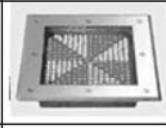


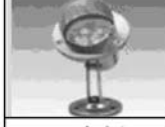

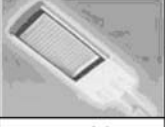

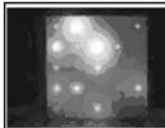
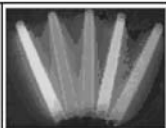
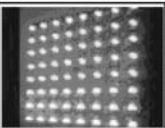


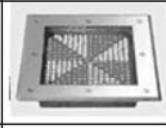


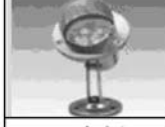

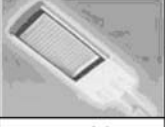

	<p>(1) 各种电气电子设备、家用电器、仪器仪表、电动玩具、控制装置与系统等的电源指示。</p> <p>(2) 仪器、设备、控制装置等的故障报警指示。</p> <p>(3) 液位、位置等指示。</p> <p>(4) 各种数字设备的工作状态指示。</p>																								
1) 作指示灯																									
2) 文字-数字显示	LED 广泛用于计算器、电子表、收音机、迷你音响、仪器仪表等的数字显示。一般为七段显示，可显示字符、数字和特定图案等。																								
3) 光通信	光通信系统中使用的 LED 要具有很好的方向性。使用广泛的两种主要光源是高辐射度 LED 和半导体注入激光器。																								
4) 制造新型光电器件	用 LED 可以制成许多新型电-光转换器件，最常用的是光电耦合器、光电计数器、光电探测器等。																								
5) 数据传输	测距、遥控等领域进行数据图像传输。																								
6) 美化亮化	各种街道、河流、桥梁、景点、主要建筑等的亮化美化工程。																								
7) 显示屏	从显示器、显示屏到 LCD 背光源等设备中有大量应用。LED 显示屏主要有单色、双色和全彩显示，色彩鲜艳，图像逼真。																								
8) 节能灯具	<p>(1) 家庭照明，光线柔和，无频闪、无辐射、无紫外线和红外线，有助于保护眼睛。</p> <p>(2) 工厂、矿山、办公室、商厦、写字楼、学校、医院、银行、体育场馆、机场、影剧院、饭店、酒吧等照明。工作时不产生电磁干扰，不影响周围其他电子设备的正常工作。</p> <p>(3) 广告、会展、舞台等照明。</p> <p>(4) 交通信号灯等。</p> <div><div>LED 灯具 (见图 6-59) 节能显著，寿命长，品种、型号、规格很多，主要应用场所如下。</div><table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>LED时尚装饰灯</td><td>LED护栏管</td><td>LED动感彩屏墙</td><td>LED地灯</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>LED地板砖</td><td>LED埋地灯</td><td>LED投光灯</td><td>LED日光灯</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>LED水底灯</td><td>LED矿灯</td><td>LED路灯</td><td>LED隧道灯</td></tr></table></div>					LED时尚装饰灯	LED护栏管	LED动感彩屏墙	LED地灯					LED地板砖	LED埋地灯	LED投光灯	LED日光灯					LED水底灯	LED矿灯	LED路灯	LED隧道灯
																									
LED时尚装饰灯	LED护栏管	LED动感彩屏墙	LED地灯																						
																									
LED地板砖	LED埋地灯	LED投光灯	LED日光灯																						
																									
LED水底灯	LED矿灯	LED路灯	LED隧道灯																						

图 6-59 常用的 LED 灯

图 6-59 常用的 LED 灯

9)LED 路灯 由于 LED 灯的节能效果十分显著，越来越多地被用于道路照明，其主要特点如下。	<p>(1) 发出的光单向性好，漫射少，能保证光照效率。</p> <p>(2) 功耗很小，节约能源，在相同亮度情况下比白炽灯节电 80%以上，比荧光节能灯节电 60%以上，具有显著的绿色环保优势。</p> <p>(3) 抗震能力高，可用于移动设备和易震场所。</p> <p>(4) 光衰小，一年的光衰不到 3%，使用寿命长，可达 10 年以上。</p> <p>(5) 大功率 LED 路灯可采用低压直流，方便由太阳能电池供电。</p> <p>(6) 可将 90%的电能转化为光，具有高效等独特优点。</p> <p>(7) 可带有用 PC 管制成的外罩，使其能耐 135℃高温和-45℃的低温。</p> <p>(8) LED 不含汞、铅等重金属，有利于回收、再生和环境保护。</p> <p>(9) 工作电压低，电流小，发热少，无安全隐患，可用于通向矿场等危险场所的道路。</p>
---	--

2. 普通发光二极管的检测

1) 辨别发光二极管的正负极	<p>(1) 目测法：首先看发光二极管引脚的长短，长引脚为正极，短引脚为负极；再是将发光二极管放在一个光源下，观察两个金属片的大小，通常金属片大的引脚为负极，金属片小的引脚为正极。对于草帽型 LED 内部的两根块状引脚（也称 LED 的支架），大支架连接的引脚是负极，小支架连接的引脚是正极。</p> <p>(2) 实验法：用直流电源低压挡，经电阻接二极管两引脚，看能不能发光；若不能发光，可将两引脚互换接，只要能发光，电源正极接的就是管子的正极；如果两种连接方式都不发光，说明发光管已损坏。</p> <p>(3) 万用表检测法：将万用表置于 R×10k 挡（注意：不能用 R×1k 挡），将两表笔分别同发光二极管的两引脚相连，如果表针偏转过半但不发光，表示发光二极管可能是反向接入，将两表笔对换后同发光二极管两引脚相连并发光，说明黑表笔接的为正极，红表笔接的为负极。</p>
2) 普通发光管性能好坏的判断	<p>(1) 测电阻：将万用表置于 R×10k 挡，测量发光二极管的正反向电阻值。发光管正常时，正向电阻值（黑表笔接正极时）约为 10~20kΩ，反向电阻值为 250kΩ~∞（无穷大）。</p> <p>(2) 电容法：用万用表的 R×10k 挡对 220μF/25V 的电解电容器充电（黑表笔接电容器正极，红表笔接电容器负极），充电后的电容器正极接发光二极管正极，负极接发光二极管负极，若发光二极管有很亮的闪光，则说明该发光二极管完好。</p> <p>(3) 电源法：用 3V 直流电源的正极串接 33Ω 电阻后接发光二极管的正极，将电源的负极接发光二极管的负极，正常的发光二极管就会发光；否则，发光二极管已损坏。</p>

3. 红外发光二极管的检测

1) 目测极性	<p>(1) 红外发光二极管多采用透明树脂封装，管内电极宽大的为负极，窄小的为正极。</p> <p>(2) 靠近二极管管身侧向小平面的电极通常为负极，另一端引脚为正极。</p> <p>(3) 红外发光二极管的长引脚为正极，短引脚为负极。</p>
---------	--

2)利用万用表	将万用表置于 $R \times 10k$ 挡,测得正向电阻约为 $15 \sim 40k\Omega$ 、反向电阻大于 $500k\Omega$ 的二极管是好的,可用;若测得正向、反向电阻值均接近于零,说明该红外发光二极管内部被击穿,损坏;若测得正向、反向电阻值均为无穷大,说明该红外发光二极管内部已开路损坏。
3)性能检测	用万用表 $R \times 10k$ 挡测量红外发光二极管的正反向电阻。正常管子的正向电阻值约为 $15 \sim 40k\Omega$,此值越小越好;反向电阻大于 $200k\Omega$,此值越大越好。 若测得正反向电阻值均接近零,说明该红外发光二极管内部已击穿损坏。 若测得正反向电阻值均为无穷大,则说明该二极管已开路损坏。 若测得的反向电阻值远远小于 $200k\Omega$,说明该二极管已漏电损坏。

4. 自闪发光二极管的极性辨别

将万用表置于 $R \times 1k$ 挡,红、黑两表笔交替接自闪发光二极管的两引脚。在测量中,表针先向右摆动一定角度,并在此位置上开始稍微抖动(振荡)时,摆动幅度在一小格左右。说明万用表黑表笔接的是自闪发光二极管的正极,红表笔接的是负极。

5. 贴片发光二极管极性检测

1) 目测	(1) 俯视贴片二极管,带彩色色环的一侧是负极,另一侧是正极。 (2) 贴片发光二极管(SMDLED)上有绿色点的一端为负极,另一端为正极。 (3) 5050 型贴片 LED 是正方形的,四个直角中有一个小角被削去,并用红色小圆圈做标记,这个带小缺角的端是负极,另一端是正极。
2) 用万用表	将万用表置于 $R \times 10k$ 挡,两表笔经电阻分接二极管的正负极。测量时二极管发光时表明红表笔连接的是负极,黑表笔连接的是正极。

6.4 光电耦合器

光电耦合器(又称光电隔离器、光耦合器、光耦,简称 GO)是以光为媒介传输电信号的器件。通常是将发光器与受光器封装在同一壳体内制成的。当输入端加电信号时发光器发光,受光器接受光照后产生光电流,从输出端输出,实现“电-光-电”的转换。光电耦合器如图 6-60 所示。

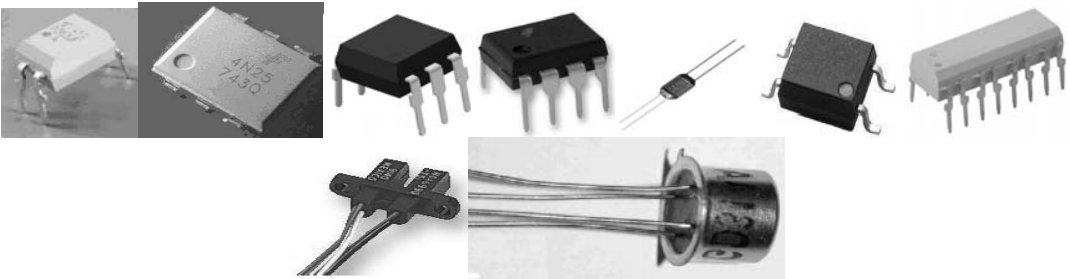


图 6-60 光电耦合器

6.4.1 基本知识

1. 光电耦合器的符号

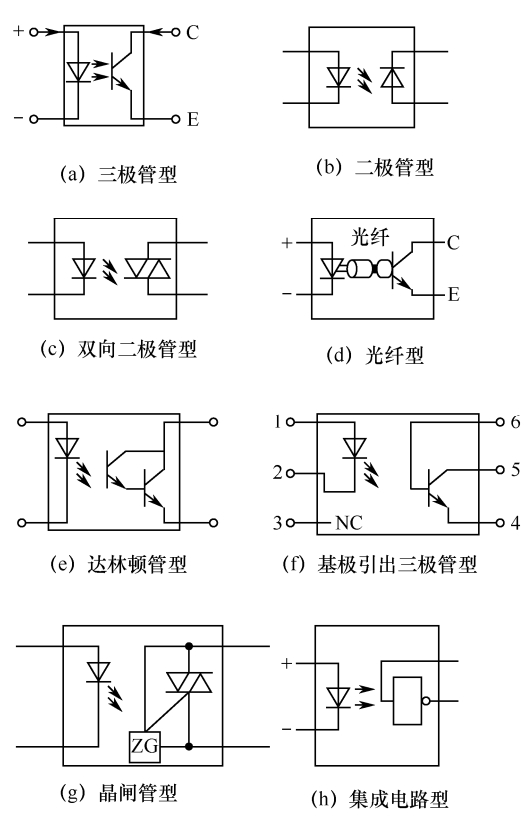
1) 文字符号	光电耦合器的文字符号可以用 GO 表示，也有用 VT、GG、OC 表示的。
2) 图形符号	<div><p>光电耦合器的种类较多，主要的差异是受光器不同。图形符号也较多，常见的如图 6-61 (a) 所示，其他图形符号如图 6-61 (b) ~ (h) 所示。</p><p>(a) 三极管型 (b) 二极管型</p><p>(c) 双向二极管型 (d) 光纤型</p><p>(e) 达林顿管型 (f) 基极引出三极管型</p><p>(g) 晶闸管型 (h) 集成电路型</p></div>

图 6-61 光电耦合器的图形符号

2. 组成

光电耦合器的种类不同，其内部构成也不同。

<p>(1) 光电二极管型光电耦合器是把发光二极管和光电二极管设计封装在同一密闭的管壳内构成的，彼此间用透明绝缘体隔离。发光二极管的两个引脚为输入端，光电二极管的两个引脚为输出端。</p> <p>(2) 光电三极管型光电耦合器一般是指发光二极管和光电三极管封装在一个管壳内构成的。信号驱动发光二极管，发出一定波长的光，被光电三极管接收并放大而产生光生电流输出。发光二极管的两个引脚为输入端，光电三极管的两个引脚为输出端。</p> <p>(3) 其他类型的光电耦合器的组成也大同小异，区别主要是接收光的器件不同，但都可以完成电-光-电的转换，并能实现输入信号和输出信号的电气隔离。</p>

3. 分类

1) 按输出器件	可分为二极管型、三极管型（分无基极引线和有基极引线两种）、达林顿管型、集成电路型、光纤型、晶闸管型（又分单向和双向晶闸管）、场效应管型等。
----------	---

2) 按封装形式	可分为管型、同轴型、双列直插型、TO 封装型、扁平封装型、贴片型及光纤传输型等。
3) 按传输信号	可分为数字型光电耦合器（包括 OC 门输出型、图腾柱输出型及三态门电路输出型等）和线性光电耦合器（可分为低漂移型、高线性型、宽带型、单电源型、双电源型等）。
4) 按速度	可分为低速光电耦合器和高速光电耦合器。
5) 按通道	可分为单通道、双通道和多通道光电耦合器。
6) 按隔离特性	可分为普通隔离型光电耦合器（隔离电压一般低于 5000V）和高压隔离型光电耦合器（可分为 10kV、20kV、30kV 等）。
7) 按工作电压	可分为低电源电压型（一般 5~15V）和高电源电压型光电耦合器（一般大于 30V）。

6.4.2 工作原理及特性

1. 工作原理（以三极管型为例）

(1) 当外加适当电压在光电耦合器输入端时，发光二极管中有电流流过并发光，光的强度取决于输入电流的大小。
(2) 发光器发出的光照射到光电三极管（即受光器）后，受光器内发生光电效应，产生的光电流经放大后由受光器输出端输出。
(3) 输入端和输出端之间实现了电气隔离。
(4) 完成电-光-电的转换。 例如，当发光器件为发光二极管、受光器件为光电三极管时，如有适当外加电压加在输入端时，发光二极管内有电流流过并发光，实现了电-光转换。二极管发出的光照射到光电三极管上，光电三极管内产生光电流（即基极电流），光电流被放大后形成集电极电流输出，实现了光-电转换功能。在一定条件下，输出电流的大小取决于光照的强弱和三极管的电流放大能力。

2. 工作特性（以三极管型为例）

1) 输入特性	光电耦合器的输入部分其实就是一个发光二极管，所以输入特性与发光二极管相似。外加电压的高低和流过的电流大小都要在允许的范围内，否则会造成器件的损坏。
2) 输出特性 光电耦合器的输出特性是指在一定的光电流 (I_D) 下，光电三极管所加偏置电压 U_{CE} (集电极与发射极间施加的电压) 与输出电流 I_C (集电极电流) 之间的关系。	<p>当无输入电压时，光电流 I_D 为零时（发光二极管不发光），光电晶体管集电极输出的电流称为暗电流，其值很小。</p> <p>当 I_D 大于零时，所对应的 I_C 基本上与 U_{CE} 无关。I_C 与 I_D 之间基本为线性关系，这时光电耦合器的输出特性与普通晶体三极管输出特性相似，如图 6-62 所示。</p> <div data-bbox="515 1500 884 1709"></div>

图 6-62 光电耦合器的输出特性

3) 隔离特性	(1) 电压隔离	光电耦合器的输入端和输出端的电压各自独立，数值可以不同。
	(2) 隔离电容	光电耦合器的输入端和输出端之间的电容值直接影响传送信号的频率。
	(3) 隔离电阻	光电耦合器的输入端和输出端之间的绝缘电阻值直接影响两端的电压差。
	(4) 地线隔离	光电耦合器的输入端和输出端的地线各自独立。
4) 传输特性	(1) 电流传输比 (CTR)	输出端的工作电压为规定值时，输出电流和发光二极管正向电流之比即为电流传输比，通常用百分数来表示，表达式为 $CTR=I_C/I_F\times100\%$ 。光电三极管型光电耦合器 CTR 的范围多为 20%~30%；达林顿型光电耦合器一般在 100%~500%之间。
	(2) 上升时间 (T_r)	光电耦合器在规定工作条件下，发光二极管输入规定的电流脉冲时，输出端输出相应的脉冲信号。输出脉冲前沿幅度从 10%升至 90%所需时间为脉冲上升时间。上升时间越小，说明输出脉冲的前沿越陡。
	(3) 下降时间 (T_f)	光电耦合器在规定工作条件下，发光二极管输入规定的脉冲信号，输出端输出脉冲后沿幅度从 90%下降至 10%所需的时间为下降时间。

6.4.3 主要参数及特点

1. 技术参数

1) 共模抑制比	光电耦合器的发光器和受光器之间的耦合电容很小，共模输入电压对输出电流的影响很微弱，所以共模抑制比很高。
2) 发光二极管正向压降 (U_F)	正向压降是指发光二极管通过的正向电流为规定值时，在输出端正负极之间所产生的电压降。
3) 正向电流 (I_F)	正向电流是指在输入端加一定的正向电压时，流过集电极的电流。
4) 反向电流 (I_R)	反向电流是指在输入端加规定反向电压时，流过集电极的电流。
5) 反向击穿电压 (U_{BR})	光电耦合器的反向击穿电压是指通过的反向电流 I_R 为规定值、发光二极管开路时，在集电极与发射极间所产生的电压降。
6) 结电容 (C_j)	在规定偏压下，输入端与输出端间的电容值。
7) 输出饱和压降 ($U_{CE(sat)}$)	是在发光二极管工作电流 I_F 和集电极电流 I_C 为规定值且 $I_C/I_F\leqslant CTR_{min}$ 时，集电极与发射极之间的电压降。
8) 反向截止电流 (I_{CEO})	反向截止电流是指在发光二极管开路、集电极至发射极间的电压为规定值的情况下，流过集电极的电流。

2. 常见光电耦合器的性能参数

常见光电耦合器参数见表 6-17。

表 6-17 常见光电耦合器参数表

型号（规格）	CTR@10mA	CTR@10mA	BV _{CEO} （V）	BV _{CEO} （V）	U _{CE(sat)} （V）	t _{ON} /t _{OFF} （us）	U _{ISO}
	I _F （%）min	I _F （%）max	min	max	max	max	AC[RM]
TLP521-1	50	600	55	7	0.4	2/3	2.5kV
TLP621-1	50	600	55	7	0.4	2/3	10kV
TLP721	50	600	55	7	0.4	3/3	4.0kV
PS2501	80	600	80	7	0.3	3/5	5.0kV
PS2561	80	400	80	7	0.3	3/5	5.0kV
817（KP1010）	50	600	35	6	0.2	18/18	5.0kV
KPC817D	50	600	35	6	0.2	18/18	5.3kV
CNX38U	70	210	80	120	0.4	20/20	5.3kV
CNX83A.W	40	—	50	70	0.4	—	5.3kV
CNY17-1	40	80	70	70	0.4	10/10	5.3kV
H11A4	10	—	30	70	0.4	—	5.3kV
H11A5	30	—	30	70	0.4	—	5.3kV
MCT2	20	—	30	70	0.4	—	5.3kV
MCT210	150	—	30	30	0.4	—	5.3kV
MCT2E	20	—	30	70	0.4	—	5.3kV
SL5500	50	300	30	30	0.4	20/50	5.3kV
SL5501	25	400	30	30	0.4	20/50	5.3kV
SL5504	25	400	80	120	0.4	50/150	5.3kV

6.4.4 检测与应用

1. 光电耦合器的检测

（1）正常情况下，将万用表置于电阻 R×1k 挡，断开光耦合器输入端的电源，测量输入端间电阻，正向电阻为几百欧，反向电阻几十千欧；输出端间电阻应为无穷大。
（2）输入端接通工作电源后，输出端引脚间的电阻很小。当输出端间的电阻发生变化时，发光强度也发生变化，说明该光电耦合器是好的。

2. 光电耦合器的选择

常见光电耦合器产品有 4N 系列、6N 系列、TLP 系列、LCR 系列、EL 系列、MCT 系列、PS 系列、PC 系列、MOC 系列、HCPL、817、CNY、SL 系列等。

（1）三极管型光电耦合器的电流传输比（CTR）的取值范围是 50%~200%。若 CTR 小于 50%，正常控制功能会增加占空比，增大光电耦合器的功耗；若 CTR 大于 200%，在电路启动或者负载发生突变时，有可能影响正常输出。
（2）在模拟电路中要选用线性光电耦合器，并根据动态工作的要求，设置合适的静态工作点，确保电路工作在线性状态，否则传送的信号会失真。

- (3) 在数字电路中可选用普通光电耦合器。普通光电耦合器的开关速度较慢，高速电路必须选用高频光电耦合器。
- (4) 光电耦合器的输入电路和输出电路必须分别采用各自的电源（即输入、输出电路不能共地），否则光电耦合器将失去电气隔离作用。
- (5) 使用单片集成多路光电耦合器，可以解决电路中信号需要双向传输的要求。
- (6) 在交流输入场合，可选用输入器有两个“背对背”发光二极管的光电耦合器。
- (7) 达林顿型光电耦合器适用于输出较大电流的场合。
- (8) 驱动交流负载，可选用输出由光触发双向晶闸管组成的光电耦合器。
- (9) 彩电、显示器等的开关电源中需要采用线性光电耦合器，否则振荡波形可能变坏，甚至会出现寄生振荡，对图像画面等产生干扰，同时会降低电源的负载能力。

3. 光电耦合器的应用

光电耦合器广泛应用于电子技术及自动控制领域，可以代替继电器、变压器、斩波器等。主要用于信号隔离、数模转换、逻辑电路、过流保护、长线传输、高压控制、电平转换、级间耦合、开关和驱动电路、脉冲放大、固态继电器（SSR）等。

线性光电耦合器主要用于传输较小的模拟电压或电流信号，其输出与输入之间呈线性关系。利用线性光电耦合器可构成光耦反馈电路，通过调节控制端电流来改变占空比，达到精密稳压目的。

1) 基本应用电路

光电耦合器的基本应用电路如图 6-63 所示。图中，输入端电源电压为 5V；SW 是开关；R₁ 是限流电阻，它的阻值决定了发光二极管中通过的电流。

输出端电源独立于输入端电源，输出端电源电压为 18V；R₂ 是负载电阻，电阻上的电压是电路的输出信号。

当开关 SW 断开后，发光管（LED）中无电流流过，不能发光，光电三极管 VQ 处于截止状态，输出电压（即 R₂ 上的电压降）接近零；当 SW 开关闭合时，LED 发光，VQ 导通，输出电压接近 18V。

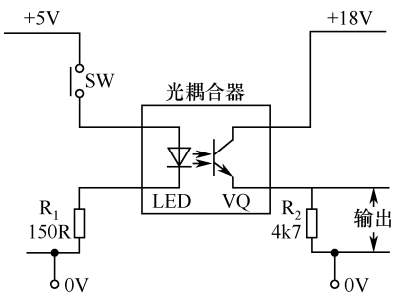


图 6-63 光电耦合器基本应用电路

2) 远距离双向传送电路

图 6-64 所示的为远距离双向传送电路，主机的输出输入接口与被测、受控设备间需要进行信号的长线传输。信号在远距离传输过程中很容易受到各种干扰，致传输信号发生畸变或失真，增大了测控的误差甚至控制的失误。

在靠近传输线的两端接入光电耦合器，不仅可大大地提高传输系统的抗干扰能力，而且可避免由地线电位差引起的地环路电流的产生，提高整个测控系统的抗干扰能力。

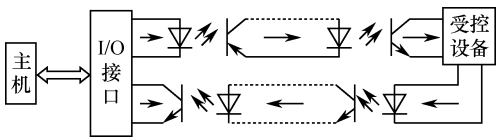


图 6-64 光耦构成的远距离双向传送电路

3) 驱动电路

在微机开关量控制系统中,控制信号经 I/O 接口输出。但 I/O 的驱动能力一般不足以直接驱动电磁执行机构,需加接驱动器电路;为减少干扰,还须采取隔离措施。

如图 6-65 所示,晶闸管主电路是交流强电回路,电压较高,电流较大,不能与微机直接相连。可采用光电耦合器将微机控制信号的形成和输出电路与晶闸管触发电路进行隔离,提高控制系统的可靠性。

4) 电平转换电路

常用电平转换电路如图 6-66 所示。传统 RS232 通信接口的高电平范围为 3~15V,低电平范围为-3~-15V。常用的 TTL 电平的低电平在 0.7V 以下,高电平为 2.7~5V。实际电路中经常两种电平共存,必须进行转换才能协调工作。图中, R_1 是限流电阻, R 为上拉电阻。

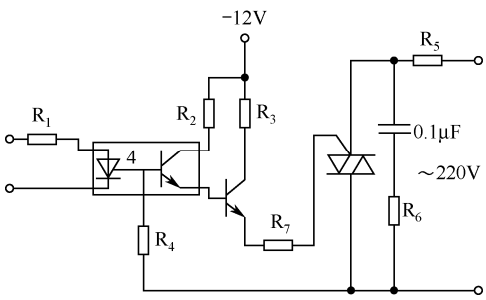


图 6-65 光电耦合器构成驱动电路

图中, R_1 、 R_2 、 R_3 为限流电阻, R_4 为补偿电阻,与双向晶闸管并联的是阻容保护电路, R_5 为负载电阻。

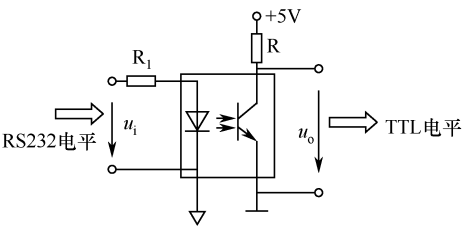


图 6-66 电平转换电路

6.5 激光二极管

激光二极管是用半导体材料制成的一种固体激光发生器。大部分激光二极管在结构上与普通二极管相似,本质上也是半导体二极管。

6.5.1 基本知识

1. 符号




1) 文字符号	发射激光的二极管用字母 LD 表示,接收激光的(即光电)二极管用 PD 表示。
2) 图形符号	<div><div>激光二极管的图形符号如图 6-67 所示。发出激光的二极管和发光二极管相似,如图 6-67 (a) 所示,也有用 6-67 (b) 表示的;接收激光的二极管和光电二极管相同,如图 6-67 (c) 所示。</div><div><div></div><div><div>(a) LD 图形符号</div><div>(b) LD 其他图形符号</div><div>(c) PD 图形符号</div></div></div></div>

图 6-67 激光二极管图形符号

2. 常见激光二极管（见图 6-68）



图 6-68 激光二极管

3. 普通激光二极管的结构

它主要由散热器、激光器芯片（激光二极管管芯）和光电二极管构成。

普通激光二极管中的光电二极管主要用于接收激光器发出的光，散热器主要是散发激光二极管工作时发出的热量。

普通激光二极管的典型内部结构如图 6-69 所示。

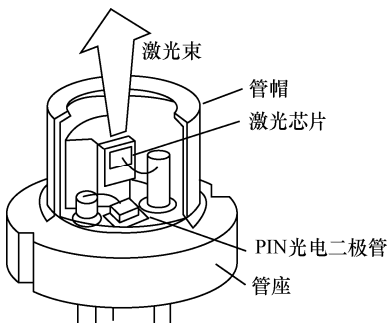


图 6-69 典型内部结构

4. 管芯结构

激光二极管的管芯结构主要有单异质结构、双异质结构、量子阱结构、垂直共振腔面发射型结构。

1) 单异质结构	单异质结构的反应区域是由不同电性能的 P 型和 N 型半导体材料形成的。这种异质结面对注入的电荷有相当局限作用，折射率也不同，应用受到限制。
2) 双异质结构	双异质结构的反应区两边都由能隙较大的材料所组成，效率较高，半导体激光二极管多采用这种结构。
3) 量子阱结构	当双异质结构的活性层厚度减到只有 100 埃左右时，电子的波动性比较显著，必须考虑量子效应。活性层可视为一量子阱，载流子（电子或空穴）的能量由连续的分布转变成成为几个特定值的能阶。活性介质层厚度越薄，波长越短。
4) 垂直共振腔面发射型结构	垂直共振腔面发射型结构激光器的共振腔非常短，输出功率受到极大限制。但其输出光束呈圆形对称，易于与光纤耦合，又方便制作垂直共振腔面发射型结构的激光数组，且价格较低，在各种局域网络（LAN）中多有应用。

5. 内部电路

在激光管内部，一般为监控输出功率而在芯片上还制作有一只光电二极管。其内部电路连接如图 6-70 所示。

激光管内部电路分为两个部分，第一部分是激光发射器，即 LD；第二部分是激光接收器，即 PD；这两个部分有一个公共电极。所以激光二极管通常有三个电极、三个引脚。如果不需要监测 LD 的输出功率，可去除 PD，此时激光管有两个电极、两个引脚。

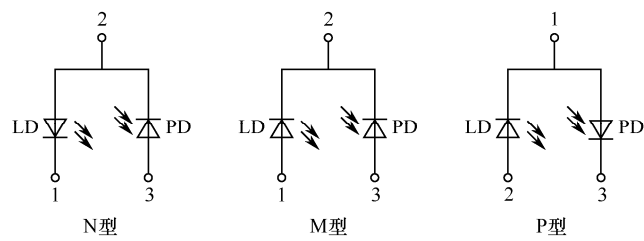


图 6-70 激光管内部连接

激光管的内部连线有 M 型、N 型和 P 型三种形式。其中，N 型激光发光二极管的正极与激光接收（即光电）二极管的负极（阴极）相连，连接处接外壳，作为公共端“2”，接外部电源；M 型的激光发光二极管的负极与激光接收二极管的负极相连（即共阴极），连接处接外壳，作为接地公共端“2”；P 型的激光发光二极管的负极与激光接收二极管的正极相连，作为公共端“1”。

6. 分类

1) 按接收器	激光二极管可分为 PIN 型和雪崩型两类。PIN 光电二极管在接收光照射、产生光电流时会带来量子噪声；雪崩光电二极管具有内部电流放大功能，比 PIN 光电二极管的传输距离更远，但量子噪声也更大。
2) 按 PN 结的材料	按 PN 结的材料可分为同质结、单异质结（SH）、双异质结（DH）和量子阱（QW）等不同类型。
3) 按波长 半导体激光二极管大致可分为短波长与长波长激光两大类。短波长的范围为 390～950 纳米（nm）；长波长的范围为 980～1550nm。还可细分为以下四类。	<p>（1）波长为 390～550nm 的激光二极管：主要应用在高分辨率打印机或高密度 DVD 光驱等。</p> <p>（2）波长为 635～670nm 的激光二极管：操作功率在 5mW 以下的激光二极管主要用于条形码阅读、激光指示和只读光信息存取系统；30mW 左右的激光二极管主要用于 DVD-R 与 DVD-RW 烧录机等存取系统；100mW 以上的激光二极管主要用于激光打印机、固态激光源及医疗器械。</p> <p>（3）波长为 750～950nm 的激光二极管：操作功率在 5mW 以下、波长 780nm 的激光二极管广泛用在 CD-ROM 光驱、CD 唱盘、CD 游戏机中；10～30mW、波长 780nm 的激光二极管主要用于 CD-R 烧录机、可擦写式微光驱等可擦写型存取系统；500mW 至 1W、波长 808nm 的激光二极管常用作激光的激励源；1W 以上的激光二极管主要用作激励大功率固态激光器，用于材料加工和处理、医学治疗、数字印刷等。</p> <p>（4）波长为 980～1550nm 的激光二极管：通常用在长距离光纤通信；操作功率在 1W 以上、具有单模、稳频操作、波长为 1310nm 或 1550nm 的激光二极管通常用作光纤通信的光源。</p>

7. 激光模组

1) 组成 激光模组（也称激光模块）是指含有激光发光管、驱动电路、	<p>激光模组中，驱动系统可提供激光管所需要的恒定电流；光学系统可以实现聚焦和扩束；晶体主要用于改变光的颜色。</p> <p>激光模组具有更高的机械强度、易安装、抗干扰、抗震动等特点，如图 6-71 所示。</p>
--------------------------------------	---

光学系统、晶体、外壳及连接等部分，且经过装配、调整、检测的功能组件。	
2) 类型	(1) 按级别：可分为普通级（即消费品质级）、工业级、工具级等档次。
	(2) 按功能：可分为点光斑模组、直线模组、十字模组、图案光斑模组、激光平行光管或扩束式模组。 点光斑模组主要作激光指示器，广泛用于玩具、瞄准仪、水平仪、遥控器等。 直线模组的发射光成平面分布，与工作面相交时投射出一条直线。直线模组主要用于激光工具、激光定位、医疗仪器等。 十字模组发射光的分布平面是相互垂直的，与工作面相交时形成互相垂直的两条直线。用途与直线模组类似。直线模组或十字模组增加简单的支架即成为“标线器”，用途广泛。 图案光斑模组可根据实际需要投射出特定的图形、图案、文字等。 激光平行光管或扩束式模组可投射出接近圆形的光斑，光束平行度较高，主要用于较高档的仪器产品。

6.5.2 产生机理和工作原理

1. 激光产生机理

在光辐射中存在着三种辐射过程。

1) 自发辐射	处于高能态的粒子在外来光的激发下自发向低能态跃迁的称为自发辐射。自发辐射时，两个同时从某一高能态向低能态跃迁的粒子发出光的相位、偏振状态、发射方向也可能不同。
2) 受激辐射	处于高能态的粒子在外来光的激发下向低能态跃迁的称为受激辐射。 受激辐射时发出的光在频率、相位、偏振状态等都与外来光完全相同。在激光器中发生的辐射就是受激辐射。
3) 受激吸收	处于低能态的粒子吸收外来光的能量向高能态跃迁的为受激吸收。

2. 产生激光的条件

在一个受激发光过程中，同时存在着受激辐射和受激吸收，只有受激辐射占据优势时才能发出激光。产生激光的具体条件有三个。

1) 实现粒子数反转	粒子数反转是产生受激辐射的必要条件，但不是充分条件。在外加电压作用下，PN结区附近会发生离子数反转，即高能粒子数多于低能粒子数，受激辐射大于受激吸收。
2) 满足门槛条件	产生激光需要有损耗极小的谐振腔，谐振腔主要是两个互相平行的反射镜，受激辐射的光在两个反射镜之间来回反射，不断引起新的受激辐射，使其不断被放大。只有受激辐射的增益大于激光器内的各种损耗，即满足一定的门槛条件，才能输出稳定的激光。

3) 反射与光震荡	激光在谐振腔内来回反射，向光子提供正反馈，只有某些特定频率的光在输出端产生加强干涉，形成光振荡，输出稳定的激光。
-----------	--

3. 激光二极管的工作原理

1) 谐振腔	半导体激光二极管含有垂直于 PN 结面的一对光滑的平行平面构成的谐振腔，两侧面相对粗糙，可消除其他方向的激光作用。
2) 空穴复合	当半导体 PN 结加有正向电压时，迫使电子从 N 区进入 P 区，空穴从 P 区进入 N 区，当电子和空穴发生复合时就会发光。
3) 粒子数反转	电子与空穴自发复合而发光的现象称为自发辐射。自发辐射所产生的光子在半导体中能激励更多电子与空穴的复合，产生新光子。这种由光子诱使而发出新光子的现象称为受激辐射。如果注入电流足够大，就会形成和热平衡状态相反的载流子分布，即粒子数反转。
4) 谐振正反馈	在载流子大量反转情况下，少量自发辐射产生的光子在谐振腔两端面间往复反射而产生感应辐射，形成选频谐振正反馈，或者说对某一频率具有增益。当增益大于吸收损耗时，就可从 PN 结发出具有良好谱线的相干光——激光。

6.5.3 主要特性和参数

1. P - I 特性曲线与特点

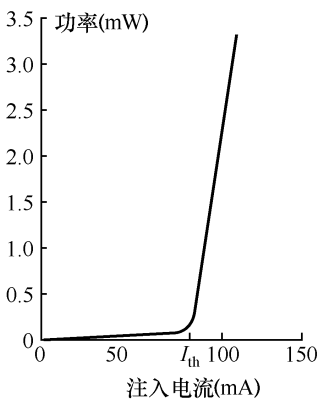
<p>1) 激光管 P-I 关系曲线</p> <p>激光二极管的典型输出功率与注入电流（即光电流）的关系曲线如图 6-72 所示。</p>	<p>图中，I_{th} 为二极管的门槛电流。在注入电流小于门槛电流时，几乎无激光发出，工作在荧光区；当注入电流大于门槛电流后，光功率迅速增大，进入激光工作区。注入电流与二极管的输出光功率几乎成正比，电流越大，输出的功率也越大。</p> <div></div>
<p>2) 温度对特性的影响</p> <p>温度对激光二极管 P-I 特性的影响如图 6-73 所示。</p>	<p>激光管的 P-I 特性对温度的变化非常敏感，在注入电流相同的情况下，温度越高，输出的光功率越少，如图 6-73 所示。</p>

图 6-72 激光二极管 P - I 关系曲线

2) 温度对特性的影响
温度对激光二极管 $P-I$ 特性的影响如图 6-73 所示。

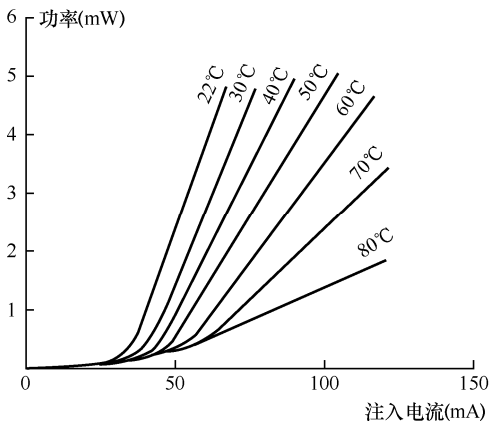


图 6-73 温度对激光管 $P-I$ 特性的影响

3) 性能特点
激光二极管具有效率高、体积小、寿命长、重量轻、耗电低、驱动电路简单、调制方便、耐冲击及抗震动等优点。但它对过电流、过电压及静电干扰很敏感、输出功率一般小于 2mW、线性度较差、单色性不够好，难以传输多通道、高性能的模拟信号，极大地限制了它在有线电视等系统中的应用。

- (1) 激光二极管具有单向导电性。在电路中，电流只能从二极管的正极流入，负极流出。
- (2) 无外加电压时，激光二极管的电场处于电平衡状态，无电流通过。
- (3) 激光二极管的注入电流密度必须大于临界电流密度，才能满足反转条件而发出激光。临界电流密度与接触面温度有关。在高温下工作时，临界电流也会提高。
- (4) 当激光二极管的注入电流密度在临界电流密度以下时，发光机制主要是自发辐射，光谱分散较广。当注入电流密度超过临界值时，开始产生振荡，频宽也相应减小。
- (5) 激光二极管的功耗极小。双异质结激光二极管的最大额定电压通常低于 2V，输入电流为 15~100mA，输出功率可达数十毫瓦。
- (6) 激光二极管能直接用电流调控输出激光的强弱。因为其输出光功率与输入电流之间为线性关系。
- (7) 输出的光束具有很强的单色性和方向性。

2. 技术参数

1) 波长 (λ)	<p>波长是指激光二极管 LD 的工作波长。常见的几种 LD 发出的近红外光的波长为 980nm、850nm、808nm 或 780nm；发出的红光的波长为 655nm；发出橙红光的波长为 635nm；发出蓝光的波长为 450nm；发出蓝紫光的波长为 405nm；发出紫外光的波长为 375nm。</p> <p>作为光电开关用的激光管的工作波长有 635nm、650nm、670nm、690nm、780nm、810nm、860nm、980nm 等。</p>
2) 发射功率 (P)	<p>(1) 发出近红外光激光二极管 LD 的功率有 0.1mW、1mW、5mW、10mW、20mW、50mW、100mW、150mW、200mW、300mW、500mW、800mW、1000mW、2W、3W、4W、5W、8W、10W、15W、20W 等。</p> <p>(2) 发出红光激光二极管的功率有 0.1mW、1mW、5mW、10mW、50mW、80mW、120mW、150mW、200mW、250mW、300mW、500mW、1W 等。</p> <p>(3) 发出橙红光激光二极管的功率有 1mW、5mW、10mW、20mW、30mW、50mW、100mW、150mW、200mW 等。</p>

2) 发射功率 (P)	<p>(4) 发出蓝光激光二极管的功率有 50mW、120mW、200mW、500mW、1W 等。</p> <p>(5) 发出蓝紫光激光二极管的功率有 20mW、50mW、80mW、120mW、150mW、200mW、250mW、300mW 等。</p> <p>(6) 发紫外线的激光二极管的功率有 1mW、5mW、10mW、20mW 等。</p>																																																																
3) 发散角	<p>(1) 垂直发散角 (θ_{\perp}): 垂直发散角是指发光带在垂直 PN 结面方向上张开的角度, 一般为 $15^{\circ}\sim 40^{\circ}$。</p> <p>(2) 水平发散角 ($\theta$): 水平发散角是指发光带在与 PN 结面平行方向上所张开的角度, 一般为 $6^{\circ}\sim 10^{\circ}$。</p>																																																																
4) 工作电压 与电流	<p>(1) 工作电压: 激光二极管 LD 发出额定功率时, 两端 (引脚) 间的电压值。</p> <p>(2) 最大工作电压: 保障激光二极管 LD 可靠、连续、正常工作情况下, 两端 (引脚) 间所承受电压的最大值。</p> <p>(3) 监控电流 (I_m): 激光二极管在输出额定功率时, 在受光器 PD 中流过的电流。</p> <p>(4) 门槛电流 (起振电流、阈值电流, I_{th}): 激光二极管开始产生激光振荡时的电流。一般小功率激光二极管的门槛值为数十毫安, 具有应变量子阱结构的激光二极管的门槛电流可低至 10mA 以下。</p> <p>(5) 正常工作电流 (I_{op}): 激光二极管达到额定输出功率时, PD 中流过的电流。</p> <p>(6) 最大工作电流: 保证激光二极管正常工作情况下, PD 中流过的最大电流。如超过这个电流值, 激光二极管极易损坏。</p>																																																																
5) 常见激光 二 极 管 的 波 长、电压、电 流的相应关系 (其中, A 为门 槛电流, B 为正 常工作电流, C 为最大电流)。	<p>(1) 波长为 980nm 的 LD, 功率是 50~500mW 时的工作电压基本一致。最大电压 $U_{\max}=1.55V$; 1W 的最大工作电压 $U_{\max}=1.60V$。其功率与电流的对应关系见表 6-18。</p> <p style="text-align: center;">表 6-18 波长为 980nm 的 LD 的发射功率与电流的对应关系</p> <table><tr><th>功率 (mW)</th><th>A (mA)</th><th>B (mA)</th><th>C (mA)</th></tr><tr><td>50</td><td>20</td><td>90</td><td>100</td></tr><tr><td>100</td><td>30</td><td>160</td><td>180</td></tr><tr><td>200</td><td>50</td><td>260</td><td>280</td></tr><tr><td>300</td><td>80</td><td>350</td><td>400</td></tr><tr><td>500</td><td>150</td><td>550</td><td>630</td></tr><tr><td>1000</td><td>350</td><td>1300</td><td>1450</td></tr></table> <p>(2) 波长为 850nm 的 LD, 输出功率为 5~800mW 时的工作电压均为 1.8V; 功率 1000mW 时的工作电压为 1.75V。其功率与电流的对应关系见表 6-19。</p> <p style="text-align: center;">表 6-19 波长为 850nm 的 LD 发射功率与电流的对应关系</p> <table><tr><th>功率 (mW)</th><th>A (mA)</th><th>B (mA)</th><th>C (mA)</th></tr><tr><td>50</td><td>15</td><td>100</td><td>120</td></tr><tr><td>100</td><td>20</td><td>150</td><td>180</td></tr><tr><td>150</td><td>50</td><td>200</td><td>230</td></tr><tr><td>200</td><td>55</td><td>250</td><td>280</td></tr><tr><td>300</td><td>90</td><td>350</td><td>390</td></tr><tr><td>500</td><td>160</td><td>600</td><td>650</td></tr><tr><td>800</td><td>230</td><td>1000</td><td>1100</td></tr><tr><td>1000</td><td>250</td><td>1300</td><td>1350</td></tr></table>	功率 (mW)	A (mA)	B (mA)	C (mA)	50	20	90	100	100	30	160	180	200	50	260	280	300	80	350	400	500	150	550	630	1000	350	1300	1450	功率 (mW)	A (mA)	B (mA)	C (mA)	50	15	100	120	100	20	150	180	150	50	200	230	200	55	250	280	300	90	350	390	500	160	600	650	800	230	1000	1100	1000	250	1300	1350
功率 (mW)	A (mA)	B (mA)	C (mA)																																																														
50	20	90	100																																																														
100	30	160	180																																																														
200	50	260	280																																																														
300	80	350	400																																																														
500	150	550	630																																																														
1000	350	1300	1450																																																														
功率 (mW)	A (mA)	B (mA)	C (mA)																																																														
50	15	100	120																																																														
100	20	150	180																																																														
150	50	200	230																																																														
200	55	250	280																																																														
300	90	350	390																																																														
500	160	600	650																																																														
800	230	1000	1100																																																														
1000	250	1300	1350																																																														

5) 常见激光二极管的波长、电压、电流的相应关系(其中, A 为门槛电流, B 为正常工作电流, C 为最大电流)。

(3) 波长为 655nm 的 LD, 输出功率 0.1~10mW 的工作电压均为 2.3V; 10~50mW 的工作电压均为 2.4V; 50~300mW 的电压均为 3.0V; 500mW、1W 的电压各为 2.85V 和 2.95V。其功率与电流的对应关系见表 6-20。

表 6-20 波长为 655nm 的 LD 发射功率与电流的对应关系

功率 (mW)	A (mA)	B (mA)	C (mA)
50	10	90	110
80	10	130	150
120	20	190	220
150	40	220	250
200	65	265	340
250	65	290	340
300	100	350	420
500	160	560	650
1000	250	1200	1400

(4) 波长为 450nm 的 LD, 输出功率 50mW、120mW 的工作电压各为 5.5V 和 5.3V; 200mW 的电压为 5.0V; 功率 500mW 的电压为 4.8V; 功率 1W 的电压为 4.65V。其功率与电流的对应关系见表 6-21。

表 6-21 波长为 450nm 的 LD 发射功率与电流的对应关系

功率 (mW)	A (mA)	B (mA)	C (mA)
50	5	100	130
120	15	140	180
200	25	260	350
500	50	550	680
1000	180	1000	1200

6) 普通激光二极管主要参数(见表 6-22)

表 6-22 普通激光二极管主要参数

型号	波长 (nm)	输出功率 (mW)	起振电流 (mA)	F 封装形式
RLD78MC	780	5	45	M
RLD78PA	780	5	45	P
RLD78PV	780	5	45	P
RLD78MC	780	5	45	M
SLD104AU	780	5	45	M
SLD1122VS	670	5	40	N
TOLD9221M	670	5	40	N
TOLD9520	635	5	30	N
HLDA6712MG	670	5	40	N

6.5.4 常见激光二极管类型及特点

1. 异质结激光二极管

异质结激光二极管是室温下可连续工作的激光二极管。早期异质结激光二极管多是单异质结 (SH) 结构, 现在最常用的激光二极管是双异质结 (DH) 结构。

DH 激光二极管具有门槛电流密度低、室温下工作、发光效率高等特点。

2. 量子阱 (QW) 激光二极管

量子阱 (QW) 激光二极管是一种特殊的 DH 激光二极管, 具有差分增益高、温度特性好、门槛电流小、输出功率大等优点, 是激光二极管的主流产品。

应变量子阱 (SQW) 激光二极管在工作时不需要考虑相关的边界匹配问题, 波长范围比 DH 激光二极管更大。

3. 分布式反馈激光二极管

分布式反馈激光二极管 (DFB-LD) 是将一个光栅集成到包围 DH 激光二极管的熔覆层上制成的。它发出的激光波长选择机构是光栅, 发出的激光谱线也很宽, 在高速调制下可动态单纵模输出。内置调制器的 DFB-LD 能满足激光发射机小型化、低功耗的要求。它发射的激光线束更细、温度稳定性更好。

常见的 DFB 激光二极管具有可见光和红外光两种类型。波长 1550nm 的 DFB-LD 广泛用于 622Mb/s、2.5Gb/s 光传输系统。

4. 垂直腔面发射激光二极管

垂直腔面发射激光 (VCSEL) 二极管是一种独特激光二极管, 采用三层式结构, 中间层是量子阱 (QW) 增益区, 上层、下层都是全反射的高反射层, 并以此构成谐振腔。二极管从顶部发射出相干性极高的激光束, 光束方向与结平面垂直。

垂直腔面发射激光二极管发射的激光束无须矫正就可以调制成环形光束, 它具有转换效率高、功耗小、调制快、光纤耦合容易、频率在 1GHz 以上、门槛很低、噪声小、成本低、易于高密度大规模制作和成管前的整片检测等特点, 可以满足高密度发射等特定应用的需要。

5. 分布布拉格反射激光二极管

分布布拉格反射激光二极管 (DBR-LD) 使用超结构光栅 SSG 结构。有源层在器件中央, 两边是折射光栅形成的 SSG 区。受周期性间隔调制, 反射的光谱变成梳状峰。同梳状光谱重合的波长可实现宽范围的波长调谐。

波长为 1550nm 的多冗余功能调谐 DFB-LD 可获得 16 个频率间隔为 100GHz 或 32 个频率间隔为 50GHz 的波长。

6. 光纤光栅激光二极管

光纤光栅就是利用光纤材料的光敏性 (外界入射光子和纤芯内铬离子相互作用引起折射率的永久性变化) 在纤芯内形成空间相位光栅, 其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的 (透射或反射) 滤波器或反射镜。用光纤光栅作为激光二极管的外腔反射器, 可以构成外腔可调谐激光二极管。

光纤光栅激光二极管 (FG-LD) 是由含有 FG 的光纤与端面镀有增透膜的 F-P 腔的 LD 耦合而成、可调谐外腔结构的激光器。它主要由 LD 芯片、间隙、光纤前端的光纤部分组成。该管具有极窄的滤波特性和波长可控的激光输出。

FG-LD 制作较简单,性能与 DFB-LD 相近,波长可以精确控制,单模输出功率大于 10mW,频宽小于 2.5kHz,噪声较低,调谐范围较宽。在光通信中有时可取代 DFB-LD。

7. 光栅耦合激光二极管 (见图 6-74)

光栅耦合激光二极管 (GCSR-LD) 是一种波长可大范围调谐的 LD, 只要改变其增益、耦合、相位和反射器各个部分的注入电流,就可改变其发射光波长,光谱范围为 445~1850nm。通常可提供需要的 322 个标准波长。光纤芯径有 100 μ m、150 μ m、200 μ m、300 μ m、400 μ m、800 μ m 等多种。光栅耦合激光二极管具有亮度高、被动冷却、使用寿命长、结构紧凑的特点,广泛应用于光纤激光器泵浦源、固体激光器泵浦源、激光焊接、医疗器械、材料加工等领域。

8. 微光机电系统激光二极管

微光机电系统激光二极管 (MOEMS-LD) 采用静电方式控制可移动表面设定或调整光学系统中的物理尺寸,进行光波的水平方向调谐;控制腔镜位置、改变 F-P 腔的长度。这种结构能制造可调谐光器件,也可用于半导体激光器集成,构成可调谐激光器。

9. 光模块激光二极管

光模块激光二极管集成了 MQWF-P 腔 LD (或 DFB-LD)、控制、驱动、输出电路等。特点是体积小、可靠性高、使用方便。它广泛应用于城域网、同步传输系统、同步光纤网络中。

10. 脉冲激光二极管 (见图 6-75)

脉冲激光二极管 (PLD) 是用脉冲电源来驱动的激光二极管,能够发出脉冲形激光。常见类型有单异质结、双异质结、多层异质结和量子阱脉冲激光二极管等。



图 6-74 光栅耦合激光二极管

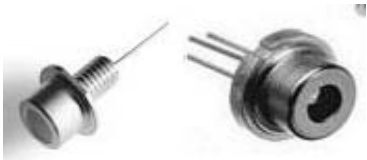


图 6-75 脉冲激光二极管

脉冲激光二极管工作时通常占空比相对较低,平均功率较小,产生的热量也少,可以达到更高的峰值功率。

各种双异质结脉冲激光二极管 (波长 850~1550nm) 广泛应用于激光测距、激光雷达等领域。

11. 红外激光二极管 (见图 6-76)

- (1) 波长为 808nm 左右红外激光二极管的最大工作电流约为 350mA,工作电压约为 3V。
- (2) 波长为 850nm 左右的红外激光二极管的最大工作电流约为 110mA。使用时要外壳

接地，内部 N 型连接的二极管内带受光器 PD。



图 6-76 红外激光二极管

6.5.5 应用与检测

1. 对驱动电路的要求

1) 稳定输出	激光二极管对过电流、过电压、静电干扰很敏感，驱动电路虽简单，但在使用时要特别注意不要使其工作参数超过其最大允许值。驱动电路通常要求用直流恒流源驱动激光二极管，以保证其稳定的输出功率。																		
2) 保证安全	在激光二极管电路中通常串联限流电阻，预防电流过大烧坏器件；同时也并联一个电容器，以防过电压的发生。																		
3) 工作温度	温度的升高会导致激光二极管注入电流的增大，为保持输出的稳定，需要采用有效的散热措施，以保证器件工作在允许的温度范围内。																		
4) 防击穿	为避免激光二极管的反向击穿损坏，通常在二极管两端反并联一个快速自恢复二极管。																		
5) 驱动方式	<p>激光二极管的驱动方式主要有恒流驱动和 APC（即自动功率控制）驱动两种。当激光二极管流过门槛以上的电流时会产生激光。但随着温度的升高，光输出量下降，光输出量和管芯温度的关系如图 6-77 中恒流驱动曲线所示。为保证激光二极管的光输出量恒定，在光输出量下降时要增大正向电流，光输出量增大时就要减小正向电流，即需要自动控制电流的大小来保持光输出量的稳定。恒流驱动与 APC 驱动的温度特性比较如图 6-77 所示。由图中可看出恒流驱动时温度变化对光输出量的影响，而 APC 驱动时光输出量稳定，与温度变化无关。</p> <div><table><caption>Data points estimated from Figure 6-77</caption><thead><tr><th>管芯温度 (°C)</th><th>APC驱动 (mV)</th><th>恒流驱动 (mV)</th></tr></thead><tbody><tr><td>10</td><td>3.2</td><td>4.8</td></tr><tr><td>20</td><td>3.2</td><td>3.8</td></tr><tr><td>30</td><td>3.2</td><td>2.5</td></tr><tr><td>40</td><td>3.2</td><td>0.8</td></tr><tr><td>50</td><td>3.2</td><td>0.0</td></tr></tbody></table></div>	管芯温度 (°C)	APC驱动 (mV)	恒流驱动 (mV)	10	3.2	4.8	20	3.2	3.8	30	3.2	2.5	40	3.2	0.8	50	3.2	0.0
管芯温度 (°C)	APC驱动 (mV)	恒流驱动 (mV)																	
10	3.2	4.8																	
20	3.2	3.8																	
30	3.2	2.5																	
40	3.2	0.8																	
50	3.2	0.0																	

图 6-77 激光二极管驱动方式比较

图 6-77 激光二极管驱动方式比较

2. 应用领域

(1) 遥控：激光二极管发出的光线可作为指示光来指向目标，在电视、汽车等的遥控器中广为应用。

- (2) 美化与烘托：在舞台灯光、环境亮化美化等工程中，激光二极管发出的光线可作为炫彩光来烘托气氛。
- (3) 激光刀：激光二极管发出的光线可作为激光刀在医疗手术中用来进行微创治疗，可减少患者的创伤和痛苦。
- (4) 测距：利用激光二极管发出的光线来测量距离，在高速公路测速、地质勘探、矿山开采等领域多有应用。
- (5) 照明：激光二极管发出的激光聚焦好，常用于探照灯等照明设备。
- (6) 激光二极管在计算机的光盘驱动器、激光打印机、条形码扫描仪、光通信等小功率光电设备中得到了广泛地应用。
- (7) 在激光切割、焊接和激光武器等大功率设备中的应用也越来越广泛。
- (8) 激光二极管还可用于仪器设备、鉴伪、安防、投影仪、水平尺等设备和产品中。

3. 激光二极管的检测

激光二极管由激光发射部分 LD 和激光接收部分 PD 两部分构成。两部分又有公共端（即引脚）。激光二极管实际上有三个引脚，要检测和判别激光二极管时可按如下步骤进行。

1) 确定引脚顺序

把万用表置于 $R \times 1k$ 挡，分别测出内部为 N 型连接的激光二极管三个引脚两两之间的阻值，当两引脚间的阻值在几千欧姆时，黑表笔所接的一端是 PD 阳极端，红表笔所接的引脚为公共端，剩下的一个引脚为 LD 阴极端。

2) PD 检测

激光二极管的 PD 部分实质上是一个光电二极管，用万用表的 $R \times 1k$ 挡测量其阻值。好管的正向电阻为几千欧姆，反向电阻为无穷大。若正向电阻为零或为无穷大，则 PD 部分已损坏；如果反向电阻只有几百千欧或上千千欧，表明 PD 部分已老化或漏电。

3) LD 检测

用万用表的 $R \times 1k$ 挡测 LD 部分的正反向阻值，好管的正向阻值应 $10 \sim 30k\Omega$ ，反向阻值应为无穷大。若测得的正向阻值大于 $55k\Omega$ ，反向阻值低于 $100k\Omega$ ，表明 LD 部分已老化，性能变差，不宜使用。


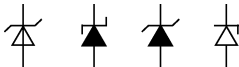
第 7 章 特殊二极管

7.1 稳压管


稳压管（又称齐纳二极管、稳压二极管、反向击穿二极管）是一种用特殊工艺制造的面结型硅半导体二极管，内含一个 PN 结。实际应用时，稳压管工作在反向击穿状态。

7.1.1 稳压管基本知识

1. 符号

1) 文字符号	稳压管的文字符号是 Dz、VD，也有的用 VS、D、DW 表示。		
2) 图形符号 (见图 7-1、图 7-2)			
	图 7-1 国标图形符号	图 7-2 其他图形符号	

2. 常见稳压管



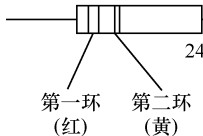
1) 两引脚（见图 7-3）			
	图 7-3 常见稳压管（两引脚）		
2) 三引脚（见图 7-4）			
	图 7-4 常见稳压管（三引脚）		
3) 产品系列	稳压管的常用国产系列是 2CW、2DW；国外系列为 BZ、BW、EQ、HZ、IN4xxx 等。		


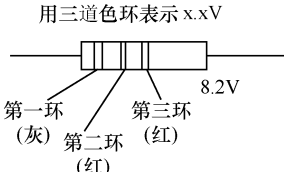
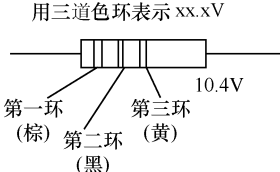

3. 分类

1) 按封装形式	主要可分为插装和贴装两大类。插装又可分为金属封装、玻璃封装（简称玻封）和塑料封装（简称塑封）三种。贴装型稳压管只是封装形式的变化，对主要性能影响不大，多为方形扁平无引脚封装，有很高的封装密度，能满足贴装工艺要求，完全可以直接取代插装型稳压管。
2) 按引脚	主要可分为两引脚（即两端）、三引脚（即三端）两类。
3) 按稳压值	主要分为低压类（稳压值一般在 40V 以下）和高压类（稳压值可达 200V 或更高）。

4. 稳压值标注

稳压管的形状、尺寸繁多，稳压值的标注方式也有多种。

<div>1) 印在外壳上</div> <div></div>	含有稳压值的型号直接印制在外壳上，一目了然，如 7805 和 7912 等。																																										
<div>2) 隐含在型号或代号中</div> <div></div>	<p>一般情况下，同一系列的稳压管顺序号大的绝对稳压值也高。例如，型号 7805、7812、7824 的稳压值分别是 5V、12V、24V；型号 7905、7912、7924 的稳压值分别是-5V、-12V、-24V。再如，型号为 1N4728、1N4733、1N4735、1N4744、1N4750、1N4761 稳压管的稳压值分别是 3.3.V、5.1V、6.2V、15V、27V、30V、75V。其他稳压管如下表所示。</p> <table><tr><th>型号</th><th>参数 (V)</th><th>型号</th><th>参数 (V)</th></tr><tr><td>2B1</td><td>1.9~2.1</td><td>6B1</td><td>5.5~5.8</td></tr><tr><td>2B2</td><td>2.0~2.2</td><td>6B2</td><td>5.6~5.9</td></tr><tr><td>2B3</td><td>2.1~2.3</td><td>6B3</td><td>5.7~6.0</td></tr><tr><td>2C1</td><td>2.2~2.4</td><td>6C1</td><td>5.8~6.1</td></tr><tr><td>3A3</td><td>2.7~2.9</td><td>7A3</td><td>6.6~6.9</td></tr><tr><td>3B1</td><td>2.8~3.0</td><td>7B1</td><td>6.7~7.0</td></tr><tr><td>5C3</td><td>5.1~5.3</td><td>11C3</td><td>11.4~11.9</td></tr><tr><td>6A1</td><td>5.2~5.4</td><td>12A1</td><td>11.6~12.1</td></tr></table>			型号	参数 (V)	型号	参数 (V)	2B1	1.9~2.1	6B1	5.5~5.8	2B2	2.0~2.2	6B2	5.6~5.9	2B3	2.1~2.3	6B3	5.7~6.0	2C1	2.2~2.4	6C1	5.8~6.1	3A3	2.7~2.9	7A3	6.6~6.9	3B1	2.8~3.0	7B1	6.7~7.0	5C3	5.1~5.3	11C3	11.4~11.9	6A1	5.2~5.4	12A1	11.6~12.1				
型号	参数 (V)	型号	参数 (V)																																								
2B1	1.9~2.1	6B1	5.5~5.8																																								
2B2	2.0~2.2	6B2	5.6~5.9																																								
2B3	2.1~2.3	6B3	5.7~6.0																																								
2C1	2.2~2.4	6C1	5.8~6.1																																								
3A3	2.7~2.9	7A3	6.6~6.9																																								
3B1	2.8~3.0	7B1	6.7~7.0																																								
5C3	5.1~5.3	11C3	11.4~11.9																																								
6A1	5.2~5.4	12A1	11.6~12.1																																								
<div>3) 色环表示</div> <div>用色环标注 (又称色环稳压二极管)。色环稳压二极管的稳压值大多低于 10V。因功率小，体积小，在管壳上标注稳压很困难，一些国外产品采用色环法标注其标称稳定电压值。色环代表两个含义：一是代</div>	<div>(1) 颜色与数字的对应关系 (见表 7-1)</div> <table><tr><th>棕</th><th>红</th><th>橙</th><th>黄</th><th>绿</th><th>蓝</th><th>紫</th><th>灰</th><th>白</th><th>黑</th></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>0</td></tr></table>	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	<div>表 7-1 颜色与数字对应关系表</div> <table><tr><th>棕</th><th>红</th><th>橙</th><th>黄</th><th>绿</th><th>蓝</th><th>紫</th><th>灰</th><th>白</th><th>黑</th></tr><tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>0</td></tr></table>		棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑																																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0																																		
棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑																																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0																																		
<div>(2) 两道色环标注</div>	<p>带色环的稳压二极管有的用两道色环、有的是用三道色环标注稳压值。最靠近负极的为第一环，后面依次为第二环和第三环。</p> <p>用两道色环标注 (见下图) 时，稳压值为两位数，即几十伏。第一环表示电压十位上的数值，第二环表示个位上的数值。</p> <div><p>用二道色环表示 xxV</p></div> <p>例如，第一、第二环颜色依次为棕、红时，其稳压值就是 12V。</p>																																										
<div>(3) 三道色环标注</div>	<p>稳压管的稳压值用三道色环标注、且第二、三道色环颜色相同 (见下图) 时，则表示稳压值为一位整数带一位小数，即几点几伏。第一环表示电压个位上的数值，第二、三两道色环 (颜色相同) 共同表示小数点后的第一位数值。</p>																																										

<p>表数字，二是代表小数点位数。具体颜色对应的数字同色环电阻。外观与色环电阻也十分相似，见下图。</p> 	<p>(3) 三道色环标注</p>	<p>用三道色环表示 $x.xV$</p>  <p>例如，第一、二、三环颜色依次为灰、红、红，表示稳压值为 8.2V。</p> <p>稳压管的稳压值用三道色环标注、且第二、三道色环不同色（见下图）时，表示稳压值是两位整数带一位小数，即几十几点几伏。第一环表示稳压值十位上的数字，第二环表示个位上的数字，第三环表示小数点后的数字。</p> <p>用三道色环表示 $xx.xV$</p>   <p>例如，三道色环的颜色是红、黑、黄时，表示稳压值为 20.4V；三道色环的颜色是棕、黑、绿时，稳压值为 10.5V；棕、黑、黄时为 10.4V；棕、黑、灰时为 10.8V。二极管管身上带有色环的一端是负极。</p>
--	-------------------	---

7.1.2 工作原理及特性曲线

当加在稳压管上的反向电压较低时，稳压管处于截止状态。当反向电压升到一定数值时，反向电流急剧增大，稳压管进入击穿状态。

1. 工作原理

PN 结被击穿后，反向电流会急剧增大，但两端间的电压几乎保持不变，只要将反向电流限制在许可的范围内就能可靠工作。稳压管就是利用 PN 结的这一特性制成的半导体器件。

1) 齐纳击穿	稳压管的反向击穿电压小于 5V 时，为齐纳击穿，具有负温度系数。
2) 雪崩击穿	稳压管的反向击穿电压大于 7V 时，为雪崩击穿，具有正温度系数。
3) 齐纳击穿和雪崩击穿兼有	稳压管的反向击穿电压大于 5V 小于 7V（如击穿电压为 6V）时，温度系数接近于零（或为零）。
4) 击穿可逆	稳压管的反向击穿是可逆的、可反复的；当反向击穿电压消失后，稳压管自动恢复原有性能。
5) 稳定电压	稳压管被击穿后，反向电流在一定范围内变化时，两端的电压基本保持不变。该电压就是稳压管的稳定电压。

2. 特性曲线

1) 反向特性

和普通二极管相比，稳压管的反向特性更陡。当施加的反向电压低于反向击穿电压时，反向电流几乎为零，此时稳压管仍处于截止状态，不具有稳压的特性。

当施加的反向电压增大至反向击穿电压后，稳压管被击穿。在击穿点处，曲线几乎成 90°弯折，反向电流急剧增加，而电压几乎保持不变。

2) 图中参数标注

稳压管的反向击穿电压 U_z 就是稳压管的工作电压，流过的电流 I_z 就是稳压管的工作电流。 I_{zmin} 表示稳压管最小工作电流， I_{zmax} 表示最大工作电流。

3) 正向特性

从曲线可以看出，稳压管的正向特性和普通二极管基本相同。

4) 当稳压管的工作电流 I_z 在 $I_{zmin} \sim I_{zmax}$ 的范围内变化时，稳压管两端的电压 U_z 基本保持不变，表现出稳压特性。

在实际使用时，只要 I_z 不大于 I_{zmax} ，就不会因过热而损坏；当外加反向电压去除后，稳压管又自动恢复原来性能。反向击穿曲线越陡，稳压管的稳压性能越好。

稳压管的伏安特性曲线如图 7-5 所示。

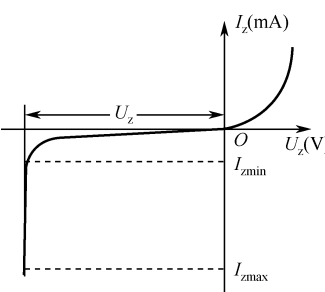


图 7-5 稳压管的伏安特性曲线

稳压管接入电路以后，电源电压发生波动或其他原因造成电压波动时，稳压管输出到负载两端的电压将基本保持不变。

7.1.3 技术参数

1. 主要技术参数

1) 稳定电压 (U_z)	稳定电压（也称稳压值）是稳压管正常工作时管子两端的电压值（即反向击穿电压）。这个数值会随工作电流、温度、制造工艺的不同而稍有改变。同一型号稳压管的稳压值有一定的离散性。例如，2CW14 硅稳压管的稳压值为 6~7.5V，2CW51 型稳压管的稳压值为 3.0~3.6V。
2) 稳定电流 (I_z)	<p>稳定电流是指稳压管产生稳定电压时通过的反向电流，是稳压管工作时的参考电流值。该电流的取值范围在最小稳定电流 (I_{zmin}) 与最大稳定电流 (I_{zmax}) 之间。最小稳定电流是指稳压管能稳定电压时所需要流过的最小反向电流。</p> <p>最大稳定电流是指稳压管正常工作时允许通过的最大反向电流，其值取决于稳压管的最大耗散功率。</p>
3) 额定功率 (P_z)	<p>额定功率（也称耗散功耗）是指反向电流通过稳压管时产生的功率损耗。该功率转变为热使 PN 结的温度升高。稳压管的额定功率等于稳定电压和稳定电流的乘积。</p> <p>稳压管的消耗功率如超过最大耗散功率将会烧坏稳压管。最大耗散功率是指稳压管的 PN 结不会因结温过高损坏而消耗的最大功率。</p> <p>小功率稳压管的额定功率多为 100~1000mW；大功率稳压管可达 50W 以上。</p> <p>例如，2CW51 稳压管的稳定电压 U_z 为 3V，稳定电流 I_z 为 20mA，额定功率 P_z 为 60mW。</p>

2. 其他参数

1) 电压温度系数 (C_{tv})	<p>电压温度系数是指稳压管的稳压值受温度变化的影响程度。电压温度系数与稳压值的大小有关。一般认为稳压值低于 5V 时的温度系数为负；大于 7V 时的温度系数为正值；稳压值在 6V 左右时温度系数近似为零。温度系数近似为零的稳压管可以用作电压基准元件。</p> <p>例如，2CW58 稳压管的电压温度系数是+0.07%/℃，即温度每升高 1℃，其稳压值将升高 0.07%。</p>
2) 动态电阻 (R_z)	<p>稳压管可等效为一个动态电阻和一个电池组的串联，如图 7-6 所示。</p> <p>动态电阻是指稳压管两端的电压变化量与流过电流变化量的比值。一个稳压管的稳压值是基本固定的，动态电阻越小，工作电流越大，稳压性能越好。</p> <p>例如，2CW7C 稳压管的工作电流为 5mA 时，动态电阻为 18Ω；工作电流为 10mA 时，动态电阻为 8Ω；工作电流等于或大于 20mA 时，动态电阻基本保持为 2Ω。</p>
3) 反向漏电流 (I_R)	<p>反向漏电流是指稳压管在规定的反向电压 U_R 作用下产生的漏电流。</p> <p>例如，2CW58 稳压管在反向电压 U_R 为 1V 时，反向漏电流 I_R 为 0.1μA；当反向电压为 6V 时，I_R 会增加到 10μA。</p>
4) 电压调整率 (S_V)	<p>电压调整率是指当稳压器的负载不变而输入的直流电压变化时所引起的输出电压的相对变化量。它表征着稳压管的稳压能力。</p>

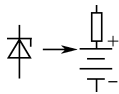


图 7-6 稳压管的等效电路

3. 参数对照表

常见稳压管国内外型号及主要参数对照见表 7-2、表 7-3。

表 7-2 常见稳压管国内外型号及主要参数对照表（一）

型号	稳压值 (V)	稳定电流 (mA)	功率 (mW)	型号	稳压值 (V)	稳定电流 (mA)	功率 (mW)
MA1030	3	5	400	MA2180	18	20	1000
MA1039	3.9	5	400	MA2240	24	10	1000
MA1043	4.3	5	400	MA2270	27	5	1000
MA1047	4.7	5	400	MA2300	30	5	1000
MA1051	5.1	5	400	MA2330	33	5	1000
MA1056	5.6	5	400	MA2360	36	5	1000
MA1100	10	5	400	MA3091	9.1	5	150
MA1110	11	5	400	MA3100	10	5	150

表 7-3 常见稳压管国内外型号及主要参数对照表（二）

国产型号	最大耗散功率 (W)	稳定电压 (V)	最大工作电流 (mA)	国外型号	国产型号	最大耗散功率 (W)	稳定电压 (V)	最大工作电流 (mA)	国外型号
2CW105-7.5V, 2CW5236	0.5	7.5	61	1N5236/A/B	2CW110-12V, 2CW5242	0.5	12	38	1N5242/A/B
2CW108-10V, 2CW5240	0.5	10	45	1N5240/A/B	2CW112-15V, 2CW5245	0.5	15	30	1N5245/A/B

(续表)

国产型号	最大耗散功率 (W)	稳定电压 (V)	最大工作电流 (mA)	国外型号	国产型号	最大耗散功率 (W)	稳定电压 (V)	最大工作电流 (mA)	国外型号
2CW113-18V, 2CW5248	0.5	18	25	1N5248/A/B	2CW5231	0.5	5.1	83	1N5993
2CW114-20V, 2CW5250	0.5	20	23	1N5250/A/B	2CW54-6V8	0.5	6.8	63	1N5996
2CW115-22V, 2CW5251	0.5	22	21	1N5251/A/B	2CW57-9V1	0.5	9.1	47	1N5999
2CW116-25V, 2CW5253	0.5	25	18.2	1N5253/A/B	2CW59-11V	0.5	11	39	1N6001
2CW119-30V, 2CW5256	0.5	30	15.1	1N5256/A/B	2CW60-12V	0.5	12	35	1N6002
2CW757, 2CW960	0.4	9.1	42	1N5735	2CW62-15V	0.5	15	28	1N6004
2CW758, 2CW961	0.4	10	39	1N5736	2CW6-20V	0.5	20	21	1N6007
2CW7592, 2CW963	0.4	12	33	1N5738	2CW71-39V	0.5	39	11	1N6014
2CW966	0.4	16	24	1N5741	2CW72-43V	0.5	43	9.9	1N6015
2CW968	0.4	20	19	1N5743	2CW5262	0.5	51	8.3	1N6017
2CW970, QA02-25A	0.4	24	15	1N5745	2CW5266	0.5	68	6.3	1N6020
2CW972	0.4	30	11	1N5747	2CW5268	0.5	82	5.2	1N6022
2CW5225	0.5	3	141	1N5987	2CW5271	0.5	100	4.0	1N6024
2CW5229	0.5	4.3	99	1N5991	2CW5273	0.5	120	3.5	1N6026

7.1.4 特殊的稳压管稳压方式

1. 两管对接

稳压管的对接就是两个稳压二极管的负端与负端相连接，构成新的器件，即双向稳压管，如图 7-7 所示。图中，A 表示阳极（即正极），K 表示阴极（即负极）。有时两管的公共阴极也被引出而成为三引脚器件。

常见低温度系数的稳压管就是由两只稳压管对接而成的双向稳压管。由于两只稳压管处于正反向工作状态时具有正负不同的温度系数，因此可以获得较理想的温度补偿。



图中，当双向稳压管的 A 端接电压正极，K 端接电压负极时，左边的稳压二极管正向导通，相当于一个普通二极管，压降是 0.7V；右边的才是稳压二极管。所以这个双向稳压二极管所稳定的电压是 0.7V 加右边稳压管的稳压值。当双向稳压管的 K 端接正电压，A 端接负电压时，右边的稳压管正向导通，左边的管为稳压二极管。

图 7-7 双向稳压管及等效电路

双向稳压管接入电路时可以不分极性，其稳压值更接近需要的电压值。

在交流电路中，用两个反向串联（对接）的稳压二极管可实现削波功能，使输入的正弦波变成近似的方波，其中两个稳压二极管的稳压值就是所获方波的正负电压值。

2. 稳压管和二极管背接

稳压管可以和二极管背接，如图 7-8 所示。其稳定电压值等于稳压管的稳压值与二极管的正向压降之和。有时两管的公共阳极也被引出而成为三引脚器件。

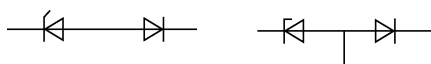


图 7-8 稳压管和二极管背接

3. 串联

两个或多个稳压管可以串联，如图 7-9 所示。稳压管串接时，应考虑所串各稳压管的稳压值、功率、外电路的电压及负载等多种因素。在各项值均不超过其额定值范围的情况下，串接后的稳压值等于所串接的两个（或多个）稳压管的稳压值之和。

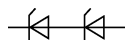


图 7-9 稳压管的串联

4. 并联

两个稳压二极管并联后接入电路时，输出电压取决于稳压值小的稳压管，稳压值大的稳压管不起作用。

两个稳压二极管并联后如果接入交流电路，可以进行削峰。但交流电压较高时稳压管很快就会被烧毁，所以在实际电路中不采用两稳压管并联连接。

5. 带温度补偿

带温度补偿稳压管（又称温度补偿稳压二极管）是一种具有良好温度特性和稳压特性的半导体稳压二极管。其实它由两个稳压管（或一个二极管和一个稳压管）串接，从公共阴极引出一根导线，成为一个三引脚器件。由于两个稳压二极管是串接的，在工作时一个为齐纳击穿，另一个雪崩击穿，相反的温度系数，使整体温度系数趋近于零，从而达到温度补偿的目的。

7.1.5 稳压电路

稳压管主要用作稳定电压、削波、限幅、钳位、电压基准元件等，广泛应用在各种稳压电路、稳压电源和保护电路等。

1. 并联型稳压电路

在对电源的精度要求不高、电流变化不大的情况下，可采用稳压值与需要电压最接近的稳压管直接同负载并联，构成并联稳压电路。

1) 电路原理图

在实用电路中，稳压管要和电阻配合使用，如图 7-10 所示。

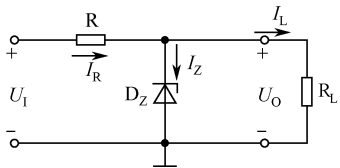


图 7-10 并联型稳压电路

图中， R 为限流电阻，可将稳压管的稳定电流限制在最小稳定电流 (I_{Zmix}) 和最大稳定电流 (I_{Zmax}) 之间的范围内，同时也能对电压起调节作用。

2) 稳压原理

在输入电压 (U_1) 或负载电阻 (R_L) 发生变化时，电路能自动调整稳定电流 (I_Z) 的大小，使 R 上的压降 ($R \times I_R$) 随之改变，达到输出电压 (U_O) 基本稳定的目的。

2. 串联型稳压电路

1) 电路原理图

简易串联型稳压电路如图 7-11 所示。图中，稳压管接在三极管 VT 的基极。限流电阻 R 限定并保证稳压管需要的工作电流。

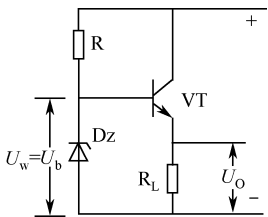


图 7-11 串联型稳压电路

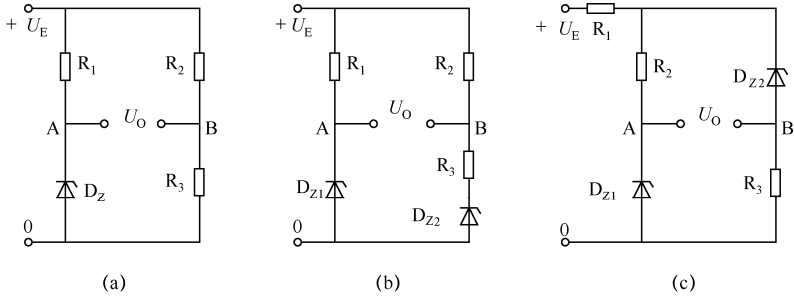
2) 稳压原理

由于三极管的基极电位被钳定在稳压管 D_z 的稳定电压 U_w 。三极管发射极的输出电压 U_O 就稳定在稳压管稳压值 (U_w) 与三极管基极-发射极电压 (一般为 $0.7V$) 的差值。

3. 采用稳压管的桥式稳压电路

1) 电路原理图

利用稳压管组成的桥式稳压电路如图 7-12 所示，有 (a)、(b)、(c) 三种桥路形式。



图中，各桥路中的电阻类型和阻值是相同的。电路的负载接在桥路的对角线 (A, B) 上，输出电压为 U_O 。稳压管的稳压值和电阻值可视需要的输出电压进行选取。

图 7-12 桥式稳压电路

2) 稳压原理

桥式稳压电路的输出电压取自桥路的对角线, 所以更稳定, 而且输出电压可以与电源 U_E 不共地。

7.1.6 其他应用

1. 浪涌保护电路

浪涌电压通常都高于稳压管的击穿电压, 所以浪涌电压袭来时稳压二极管都会迅速被击穿, 保证后续电路上电压的基本稳定, 从而保护后面的电子元器件不被损坏。

如图 7-13 所示, 稳压二极管 D_z 是过压保护器件, R_s 是限流电阻。当电源电压 U_s 因浪涌电压袭来而超过稳压二极管的稳压值时, 稳压管 D_z 就被迅速击穿而导通, 继电器线圈有电流通过, 致使动开触点断开, 切断负载 R_L 的电源, 起到保护作用。

2. 过压保护电路

图 7-14 中, 电路给定电源电压为 15V, 如果这个电压过高, 电阻 R_2 上的分压也随着升高, 致使稳压管 D_z 导通、三极管 VT 导通。三极管集电极电位将由原来的高电平变为低电平。通过控制线送出低电平信号, 使被控设备进入待机保护状态。

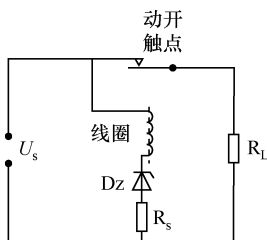


图 7-13 浪涌过压保护电路

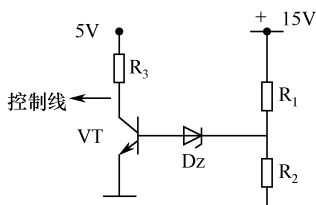


图 7-14 过压保护电路

3. 作续流二极管

电弧抑制电路如图 7-15 所示。该电路在较大功率的继电器、断路器、开关变压器等电磁控制装置中用得广泛, 当然图中的稳压管也可以用相应的二极管代替。

图中, 电感线圈与稳压二极管并联, 当线圈在导通状态下突然切断时, 线圈中储存的电磁能将迅速释放而产生的高电压就会通过稳压管支路释放而保持线圈中的电流继续流动, 使线圈储存的电磁能量由支路电阻 R_s 所消耗。所以开关断开时产生的电弧也就被减弱或消除。

4. 钳位

利用稳压管构成的钳位电路如图 7-16 所示。

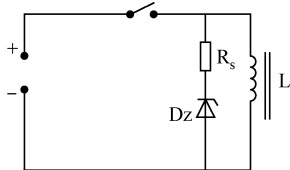


图 7-15 电弧抑制电路

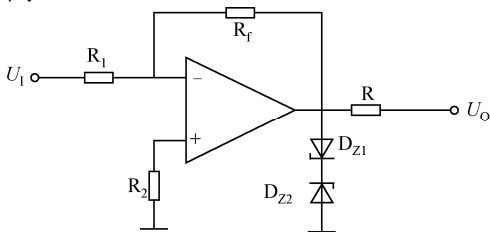


图 7-16 稳压管钳位电路

图中，两个稳压二极管反向串联后接在放大器输出端与地之间。保证放大器的输出电压被钳位在稳压管的稳压值和稳压管正向压降的和。两个稳压管的对接，具有温度补偿作用，提高了输出电压的精度。

5. 基准电压

稳压管经常在稳压、稳流电源系统中作基准电压元件，具体电路如图 7-17 所示。

图中， R 为限流电阻， R_L 为负载电阻，三极管 VT 工作在放大状态。

电阻 R 保证并限制稳压管中流过的电流。当输入电压 U_I 在小范围变化时，电阻 R 中的电流也随之增减（电流的变化要在稳压管的工作电流允许范围之内）。当 U_I 增大时，电阻 R 中的电流增大，压降增加，致使三极管 VT 的基极电压变低，基极电流变小，三极管上压降就随着增大，于是保证了输出电压 U_O 基本不变，达到稳压的目的，反之亦然。

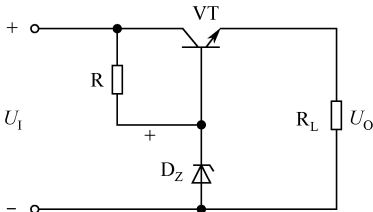


图 7-17 基准电压

6. 简易稳压电源

简易稳压电源的原理图如图 7-18 所示。图中， $D_1 \sim D_4$ 组成单相整流桥， C 为滤波电容器， R 为限流电阻， R_L 为负载电阻。

220V 的交流电经变压器降压后加到整流桥上，整流桥输出的直流电压经滤波后获得波形较平坦的直流电压，经稳压管稳压后输出到负载。

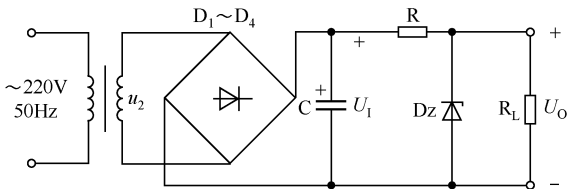


图 7-18 简易稳压电源

在图 7-18 所示电路中，当电网电压升高（或降低）时，整流、滤波电路输出电压 U_I 也升高（或降低）。这就会引起稳压电流的增大（或减小），从而使限流电阻 R 上的电流和电压降也随着增大（或减小），从而保持输出电压 U_I 的基本稳定。

同理，当负载电阻减小（或增大）时，负载电流会增大（或减小），于是 R 上的压降也随着增大（或减小）；在 U_I 不变时，稳压电流会下降（或增大），维持总电流基本不变，进而使 U_O 基本保持稳定。

7.1.7 三端稳压管

1. 外形及引脚定义

常见三端稳压管的外部形状及引脚定义如图 7-19。

稳压管的三端（即三个引脚）是指电压输入端、电压输出端和公共接地端（或电压调整端）。

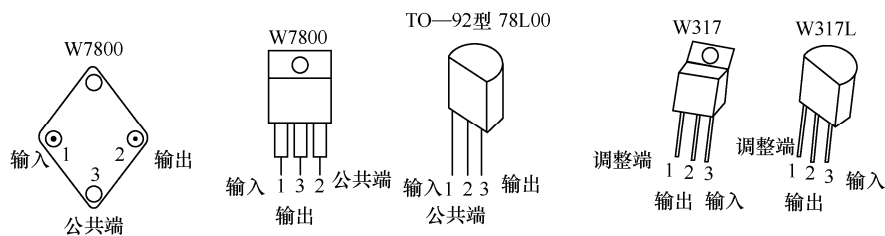


图 7-19 三端稳压管外形及引脚定义

2. 分类

1) 固定输出三端稳压管	还可细分为三端固定输出正电压稳压管和三端固定输出负电压稳压管。
2) 可调输出三端稳压管	还可细分为三端可调输出正电压稳压管和三端可调输出负电压稳压管。

3. 固定输出三端稳压管

固定输出三端稳压管的电路原理框图如图 7-20 所示。三个端子分别是输入端、输出端和公共端。内部由调整管、保护电路、放大器、基准电路、启动电路等组成。

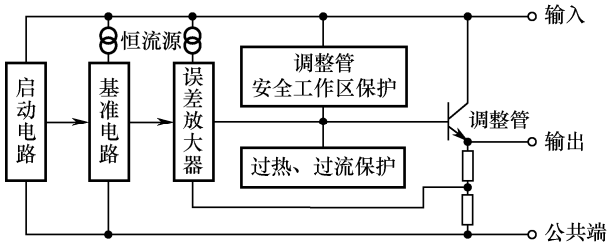


图 7-20 固定输出三端稳压管电路原理框图

4. 可调输出三端集成式稳压管

可调输出三端稳压管是一种悬浮式串联调整稳压器，是通用化、标准化的集成稳压器，被称为第二代三端稳压管。可调输出三端式集成稳压管输出电压可调，稳压精度高，输出纹波小，只需外接两只不同的电阻，即可获得需要的稳定输出电压。可调输出三端式稳压管型号、品种较多。有时不同厂家的相应产品可以互换。

(1) 外形：常见可调输出三端稳压管的两种外形如图 7-21 所示。图中稳压器的三端分别是电压输入端 U_i 、电压输出端 U_o 和调整端 ADJ。

图 7-21 可调输出三端稳压管外形图

(2) 原理框图：可调输出三端稳压管的内部原理框图如图 7-22 所示。

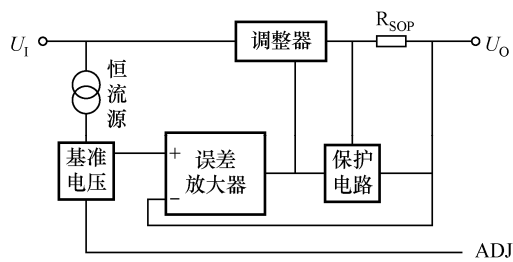


图 7-22 可调输出三端稳压管的内部原理框图

通常分为正电压可调稳压器（如 W117、W217、W317、123、138、140、150 等）和输出负电压可调稳压器（如 W137、W337 等）。

5. 性能特点

三端稳压管是将启动电路、调整管、取样电路、基准电压、误差放大、保护电路等全部集成在一块芯片上的集成稳压管。

1) 外接器件少，实用电路简单	利用可调输出稳压管，只要外接两个电阻就可以在一定范围内确定输出电压，简单方便。
2) 有的输出电压可调，灵活方便，性能优良	可调输出电压稳压管的主要技术性能指标优于固定电压三端稳压管。
3) 具有过电流、过热等保护功能	可调输出稳压管即使在调整端悬空的情况下内部各种保护电路仍然有效。
4) 有些产品型号中隐含主要技术参数，方便选择和使用	(1) 隐含输出电压的正负：三端稳压管的通用产品 78 系列的输出电压为正；79 系列的输出电压为负。
	(2) 隐含输出电压数值：型号的后两位数字表示输出电压的数值，如 7805 的输出电压是 5V，7824 的输出电压是 24V，7905 的输出电压是 -5V。
	(3) 隐含输出电流的大小：以 78（或 79）系列为例，型号中间加字母表示器件额定电流的大小，其中 L 表示输出电流为 0.1A，M 表示输出电流为 0.5A，无字母表示输出电流为 1.5A。例如，78L05 表示输出正电压是 5V，额定电流为 0.1A。
5) 同一种产品可有多种型号	例如，稳压器 7805 因生产厂家不同而有 CW7805、W7805、LM7805 等多种型号，但其原理、性能及参数基本一致，可以互相替换，其他型号的情况也类似。

6. 典型应用电路

固定输出三端稳压管最基本、最典型的应用电路如图 7-23 所示。图中四个电容皆为滤波电容器。发光二极管 VD 为电源指示灯，输出电压为 5V。1kΩ 的电阻为发光二极管的限流电阻。

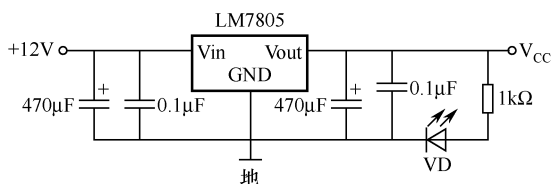


图 7-23 三端稳压管典型应用电路

7. 双电源电路

双电源电路原理图如图 7-24 所示。图中，三端稳压管 7812 的输出电压是 +12V，7912 的输出电压是 -12V。供电电源经变压器降压后加到由四个二极管构成的单向整流桥上，各电容皆为滤波电容器。

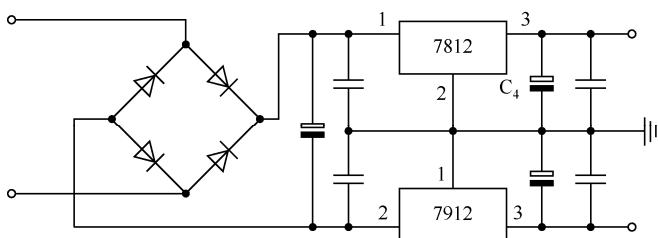


图 7-24 三端稳压管构成的双电源电路

两个稳压管按图示方式连接，便构成一个输出电压为 $\pm 12\text{V}$ 的双电源电路。

8. 输出电压可调的稳压电源

三端稳压管 CW317 的稳定电流大于 5mA 。输出电压 U_O 和调节端 adj 之间的电压差恒为 1.25V 。调节电阻 R_2 上的分压就可以获得不同的输出电压。

流经 R_1 的电流范围一般为 $5\sim 10\text{mA}$ 。 R_P 为精密可调电位器。电容 C_2 与 R_P 并联组成滤波电路，以减小输出的纹波电压。

电阻 R_1 的阻值不要大于 240Ω ，以保证 5mA 的最小稳定工作电流，否则 317 工作可能不稳定。

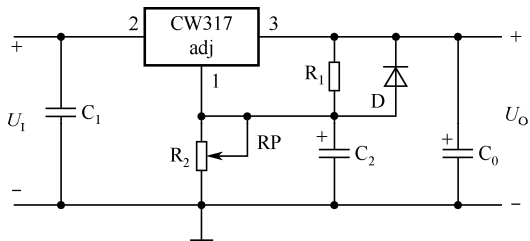


图 7-25 输出正电压可调的三端稳压管电路图

图中，CW317 是可调式三端稳压管能输出连续可调的正电压。稳压管内部含有过流、过热保护电路。二极管 D 是起保护作用的。

CW317 输出电压 U_O 的变化范围为 $1.25\sim 37\text{V}$ ，连续可调；最大输出电流是 1.5A ；最小输入、输出电压压差为 3V 。317 系列稳压管型号有 CW317、LM317、W317 等多种。

稳压电源的输出电压为 $U_o=1.25(1+R_2/R_1)V$ ，所以电路中的 R_1 和 R_2 的阻值大小和精度都需要精心选定。

9. 输出可调负电压的稳压电源

利用可调三端稳压管也可构成输出负电压的稳压电源，具体电路如图 7-26 所示。

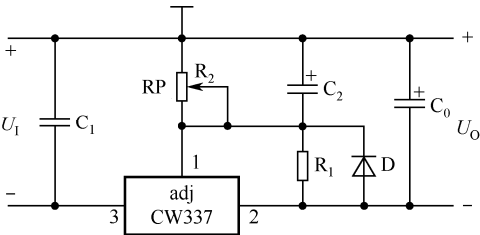


图 7-26 输出负电压可调的稳压电路

图中，CW337 是能输出连续可调负电压的稳压器，电路中二极管 D 起保护作用。其工作原理和元件参数的选择与输出正电压可调的稳压电源相似。

7.1.8 稳压管的辨别与检测

1. 稳压管与二极管的辨别

1)利用摇表	(1) 看表针摆幅 将摇表、电压表和被测管连接好，按额定转速摇兆欧表，如果是二极管，电压表指针摆动幅度较大；如果是稳压管，表针摆动很小。
	(2) 测击穿电压 利用摇表提供合适的反向电压将被测管反向击穿，利用万用表的 10V 直流电压挡或 50V 的直流电压挡测出反向击穿电压值，二极管的击穿电压一般高于 40V；低于 40V 时多为稳压管（锗二极管除外）。
2) 利用万用表	利用万用表的 R×10k 挡，黑表笔接负极，红表笔接正极，电阻较小的是稳压管，电阻为无穷大的是二极管。但此方法只能测量反向击穿电压比万用表电池电压低的稳压管。

2. 稳压管的检测

1)正负极的判别	(1) 目测 金属封装稳压二极管管体的正极一端为平面形，负极一端为半圆面形；塑封稳压二极管管体上印有彩色标记的一端为负极，另一端为正极。
	(2) 用万用表 用万用表 R×1k 挡，将两表笔分别接稳压二极管的两个极，测出一个阻值；对调两表笔后再测出一个阻值。在阻值较小那一次，黑表笔接的是稳压二极管的正极，红表笔接的是稳压二极管的负极。
2)好坏判别	如果用万用表测得稳压二极管的正反向电阻都很小或皆为无穷大，表明该稳压管已击穿或开路，已经损坏，不能再用。

3. 稳压值的测量


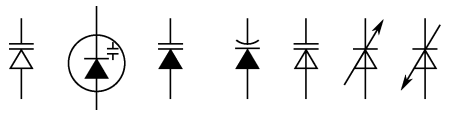
1) 用万用表测量	将稳压二极管、电阻和电流表串联后与可调式稳压电源相连接，电源正极接被测稳压二极管的负极、电源负极接稳压二极管的正极，调节稳压电源的输出电压，使电流表的读数大于 5mA。然后用万用表测量稳压二极管两端的电压，读数即为稳压二极管的稳压值。
2) 用摇表测量	将摇表正端与稳压二极管的负极相接，摇表的负端与稳压二极管的正极相接后，按规定匀速摇动摇表手柄的同时，用万用表合适的电压挡监测稳压二极管两端间的电压值。当万用表的电压读数稳定时，此电压值便是稳压二极管的稳压值。 若测得稳压二极管的稳压值忽高忽低，说明该稳压管的性能已变坏，不能使用。

7.2 变容二极管

变容二极管（又称可变电抗二极管、压控电容器、电压调谐电容器、调谐二极管）属于反向偏压二极管，是利用 PN 结电容随外加反向偏压变化而变化的特性制成的特殊的小功率二极管。

7.2.1 变容二极管基本知识

1. 符号

1) 文字符号	变容二极管的文字符号是 VR、VD，也有用 D、CR 等字母表示的。
2) 图形符号	<div>(1) 国标图形符号（见图 7-27）。</div> <div>(2) 其他图形符号（见图 7-28）。</div> <div></div> <div></div> <div>图 7-27 国标图形符号 图 7-28 变容二极管的其他图形符号</div>

2. 封装

变容二极管封装形式有玻璃外壳封装（玻封）、塑料封装（塑封）、金属外壳封装（金封）和无引线表面封装等多种封装形式。中、小功率的变容二极管采用玻封、塑封或表面贴装，而功率较大的变容二极管多采用金封。

3. 外形

常见变容二极管外形如图 7-29 所示。

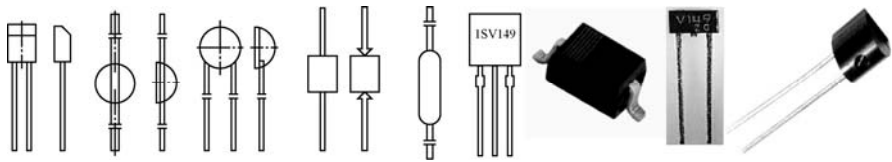
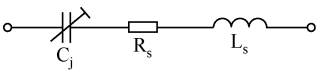
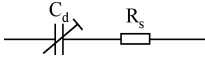


图 7-29 常见变容二极管外形

4. 结构与分类

1) 结构	变容二极管内含一个 PN 结，通常为面接触型或阶梯接触型结构，以扩大接触面、增大结电容。
2) 分类	(1) 按 PN 结的形式可分为合金扩散型、外延结合型、双重扩散型等。
	(2) 根据 PN 结的结构和结面附近杂质的分布情况，变容二极管可分为缓变结型、突变结型和超变结型三种。

5. 变容二极管的等效电路

<p>1) 等效电路</p> <p>变容二极管的等效电路如图 7-30 所示。图中，C_j 表示可变电容，即变容二极管的总电容，包括结电容、外壳电容及分布电容；R_s 表示串联的电阻，它包括 PN 结电阻、引线电阻及接线电阻；L_s 表示引线电感。C_j、R_s 及 L_s 都是反向偏压的函数，其中 C_j 与反向偏压的关系是变容二极管的主要特性。</p>	 <p>图 7-30 变容二极管的等效电路</p>
<p>2) 简化等效电路</p> <p>在很多情况下，变容二极管的引线电感非常小，可以忽略不计，其简化等效电路为可变电容 C_d 和电阻 R_s 的串联电路，如图 7-31 所示，其中电容 C_d 就是总电容。变容二极管经常作为可变电容器用于自动频率控制、调频、锁相环、谐振电路等。</p>	 <p>图 7-31 变容二极管的简化等效电路</p>

7.2.2 工作原理及特性

1. 工作原理

变容二极管加上反向电压（变容二极管是在反向偏压下工作的）后，N 型半导体内的电子被吸引到正极，P 型半导体内的空穴被吸引到负极，变得如电容器的两个极板，结中间形成既没有电子也没有空穴的耗尽层，犹如电容器的电介质。耗尽层的宽度随着反向电压的变化而变化。反向电压增大，耗尽层变宽，PN 结的电容量就减少；反向电压减小，耗尽层变窄，PN 结的电容量变大。

2. 电压-电容特性曲线

变容二极管通常工作在反向偏置下，其电压-电容特性曲线如图 7-32 所示。图中，横轴表示加在变容二极管的反向偏压，竖轴表示结电容的大小。变容二极管的结型不同，其电压-电容曲线的变化规律也不同。

三个同结变容二极管的电压-电容特性曲线如图 7-33 所示。

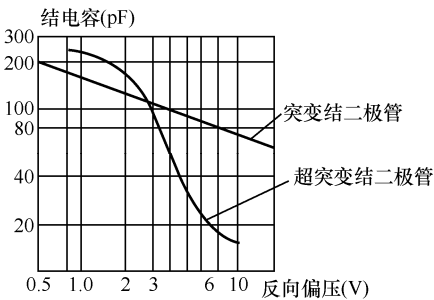


图 7-32 不同结变容二极管的电压-电容特性曲线

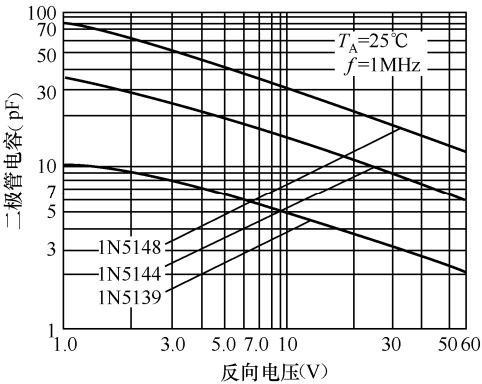


图 7-33 三个同结变容二极管的电压-电容特性曲线

3. 性能特点

(1) 变容二极管的结电容随着施加在两端反向电压的增大而逐渐减少；反向电压越大，结电容越小；反向电压越小，结电容越大。其结电容的变化范围比普通二极管大得多。
(2) 反向电压与结电容之间的关系是非线性的。
(3) 变容二极管结电容的大小是可控制的，增高反向电压，电容量就减少；降低反向电压，电容量就增大。
(4) 变容二极管的结型不同，其结电容容量的变化速率也不同。
(5) 变容二极管在工作中，电流流过串联电阻 R_s 会使变容二极管发热，产生损耗，这种损耗越大，变容二极管的品质越差。

7.2.3 主要参数

1. 技术参数

1) 最高反向工作电压 (U_R)	最高反向工作电压是指加在变容二极管两端的最大反向电压，它不能超过二极管的电压允许值。否则会导致二极管的性能变差直至损坏。
2) 反向击穿电压 (U_B)	反向击穿电压是指变容二极管发生击穿时两端的反向电压。它决定了变容二极管的最小结电容。
3) 结电容 (C)	结电容是指变容二极管在施加特定反向电压时内部 PN 结的电容量，一般为几个皮法，有的可达一二百皮法。
4) 结电容变化范围	结电容变化范围是指在工作电压允许变化范围内结电容量的变化值。常用最小值、标称值、最大值间接表示。
5) 零压结电容	零压结电容是指施加在变容二极管两端的电压为零时的结电容值，这时的结电容最大。
6) 电容比	在零压时，结电容最大；在临近击穿时，结电容最小。电容比是指变容二极管的最大电容与最小电容之比，通常约为 5:1。各类变容二极管的最大电容的量值不尽相同，取值范围大致在 5~300pF 之间。
7) 优值	优值（又称 Q 值）是变容二极管的品质因数。它反映了变容二极管的回路能量损耗特性。一般 Q 值在几十至二百之间。
8) 截止频率	变容二极管的 Q 值随着频率的升高而降低，规定 $Q=1$ 时的频率为截止频率。实用频率必须低于截止频率。

2. 常用变容二极管及其主要参数

1) 国产变容二极管

常用的国产变容二极管主要有 2CC 系列和 2CB 系列。几种国产型号的主要参数见表 7-4。

表 7-4 几种国产型号的主要参数

参数 型号	电容量 (pF)	最高反向 工作电压 (V)	反向电流 (mA)	电 容 比	效率	工作频率 或频段
2CC120/220/320/420	18~20 (3V), 7~10 (10V)	30	≤0.1	6	120	5~50MHz
2CC104/204/304	10~35 (4V)	60	≤0.5	≥2	≥250	5MHz
2CC32	14~16.5 (2V), 4~5.5 (12V), 2.1~3.4 (25V)	—	≤0.1	5.5	—	UHF
2CC33/A	27.19~32 (2V), 6~7.5 (13V), 10~11 (25V)	—	≤0.1	5.5	—	VHF
2CC34	11.3~12.8 (3V), 4.38~5.42 (10V), 2.6~3.2 (25V)	—	≤0.1	5.5	—	UHF
2CC338	27.27~32.14 (2V), 7.1~9.9 (10V), 2.6~3.2 (25V)	—	≤0.1	5.5	—	VHF
2CB221	10.33~12.9 (3V), 2.01~2.51 (25V)	28	<0.1	4.5~6	—	UHF
2CB121	10.5~16 (2V), 3.3~5.7 (10V)	30	<0.1	2.5~3.4	—	AFC

2) 其他变容二极管

常见其他变容二极管有 1SV 系列、S 系列、KV 系列、1T 系列等。几种常用型号变容二极管的主要参数见表 7-5。

表 7-5 几种型号变容二极管的主要参数

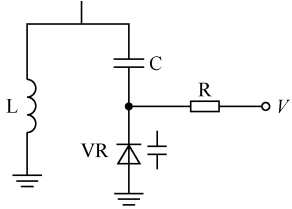
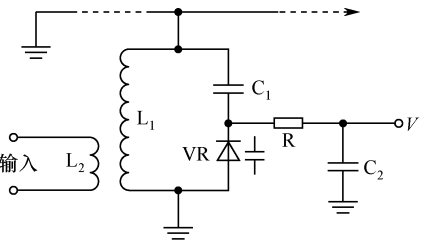
参数 型号	电容量 (pF)	最高反向工作电压 (V)	反向电流 (mA)	电容比	工作频率或频段
1SV50	18.25~32.44 (3V), 5~5.75 (25V)	28	≤10	≥5	VHF
1SV70	10~12.65 (3V), 2~2.2 (25V)	30	≤10	5~6	VHF
1SV89	10.5~16 (2V), 3.3~5.7 (10V)	35	≤10	2.5~3.4	AFC
1SV97	18~25 (3V), ≥2.4 (25V)	28	≤10	≥8	VHF
1SV101	30 (2V), 12 (9V)	—	—	2.4	100MHz
S-153	16 (2V), 2.1 (9V)	—	≤10	7	>600MHz
S-208	12 (2V), 2.7 (9V)	—	≤10	>4.5	>900MHz
1T32/A	14.01~16.33 (2V), 2.1~2.39 (25V)	35	≤10	>5.5	UHF
1T33/A	27.19~32.03 (2V), 2.71~3.04 (25V)	35	≤10	10~11	UHF
1T25	14~16.33 (2V), 2.1~2.39 (25V)	28	≤10	>5.5	UHF
KV-1236	540 (1V), 30 (8V)	—	≤10	20	AM
KV-1310	93 (2V), 43 (8V)	—	≤10	2.3	>100MHz

7.2.4 应用与检测

1. 变容二极管的应用

变容二极管经常作为可变电容器用于自动频率控制、调频、锁相环、谐振电路等。

变容二极管由于制造材料、工艺等不同，其特性各有差异。例如，扩散型等特殊制作的变容二极管的结电容量变化率特别大，宜作为可变电容器用于调谐电路。变容二极管因其结构的独特性、参数的离散性，使用时应逐个挑选。

1) 典型应用电路	<div></div> <p>图 7-34 变容二极管典型应用电路</p> <p>图中，VR 是变容二极管，电容 C 与二极管 VR 串联后与 L 并联构成 LC 并联谐振电路。当外加电压 V 通过电阻 R 加到 VR 负极时，VR 承受负偏压。这个电压变化时，VR 的反向偏置电压就随着变化，使二极管的结电容的大小也跟着改变，致使 LC 并联谐振电路的谐振频率发生变化。</p>
2) 构成调谐电路 利用变容二极管组成的 LC 振荡电路如图 7-35 所示。	<p>图中，L_2 为电路耦合电感，可将射频信号耦合到振荡电路。LC 振荡电路包括主电感 L_1、变容二极管 VR 与串联电容 C_1。电阻 R 和电容 C_2 的作用是对调谐电压进行滤波，以提高输出信号质量。</p> <div></div> <p>图 7-35 变容二极管的调谐电路</p>

2. 变容二极管的检测

1) 好坏检测	<p>置万用表于 $R \times 10k$ 挡，先后测量变容二极管的正反向电阻值。正常变容二极管的正反向电阻值均为无穷大。若测量的正反向电阻值均有一定阻值或均为零，则表明二极管漏电或被击穿损坏。</p>
2) 正负极的判别	<p>(1) 目测</p> <p>变容二极管涂有黑色标记的一端为负极，另一端为正极；如果管壳两端分别涂有黄色环和红色环，则红色环的一端为正极，黄色环的一端为负极。</p> <p>(2) 用万用表</p> <p>置万用表于 $R \times 1k$ 挡，先后测量其正反向电阻值。如电阻值约为 $6.5k\Omega$ 和无穷大，则</p>

	可判定第一次为正向接法，正向电阻为 6.5kΩ；第二次为反向接法。第一次测量时黑表笔接的引脚为阳极，红表笔接的为阴极。
3)测电容值	用线性电容表测量变容二极管的结电容值时，可选用线性电容表的 100pF 量程。

7.3 肖特基二极管

肖特基二极管（也称肖特基势垒二极管、金属-半导体（接触）二极管、表面势垒二极管，缩写 SBD）是以贵金属为正极、以 N 型半导体为负极，利用二者接触面上形成的势垒具有整流特性而制成的金属-半导体器件。

7.3.1 肖特基二极管基本知识

1. 符号

1) 文字符号

肖特基二极管的文字符号为 VD 或 SBD。

2) 图形符号

肖特基二极管的图形符号如图 7-36 所示。

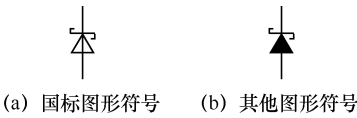


图 7-36 肖特基二极管的图形符号

2. 常见肖特基二极管（见图 7-37）



图 7-37 肖特基二极管

3. 结构

肖特基二极管是利用金属与半导体接触形成的金属-半导体结制成的。金属材料可以是铝、金、钼等；半导体材料一般为硅（Si）或砷化镓（GaAs）等。

肖特基二极管的典型结构如图 7-38 所示。图中，肖特基二极管内部是由氧化硅电场消除材料、N-外延层和 N 型硅基片、N+阴极层及阳极金属等构成。二极管的 N 型基片和阳极金属之间形成肖特基势垒。

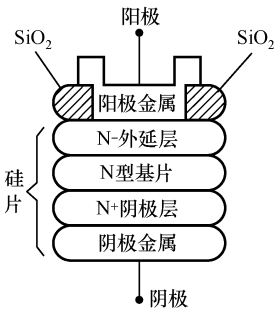


图 7-38 肖特基二极管的典型结构

4. 类型

肖特基二极管按内部结构可分为单管、对管两种形式。

5. 对管内部连接

对管又分为共阳极对管、共阴极对管和串联对管三种连接方式，其内部连接及引脚如图 7-39 所示。

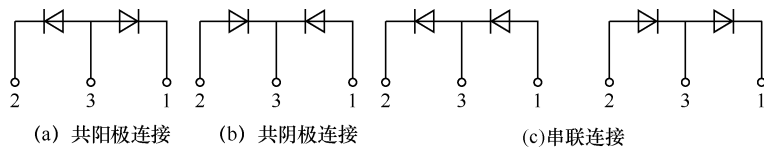


图 7-39 对管内部连接及引脚

两管的阳极相连，其连接处引出线为公共引脚。
两管的阴极相连，其连接处引出线为公共引脚。
一只二极管的正极接另一只二极管的负极，两管连接处的引出线为公共引脚。

6. 肖特基对管的封装

肖特基二极管的封装一般分为有引线封装和表面贴装两种类型。
贴装肖特基二极管是节省空间的芯片级封装形式。

1) 有引线封装及封装形式（见图 7-40（a））

采用有引线式封装的肖特基二极管通常作为高频大电流整流二极管、续流二极管或保护二极管使用。有单管和对管两种封装形式。

2) 贴装

封装及封装形式如图 7-40（b）所示。
其主要规格有 1A20V、1A40V、1A60V、1A100V 等。

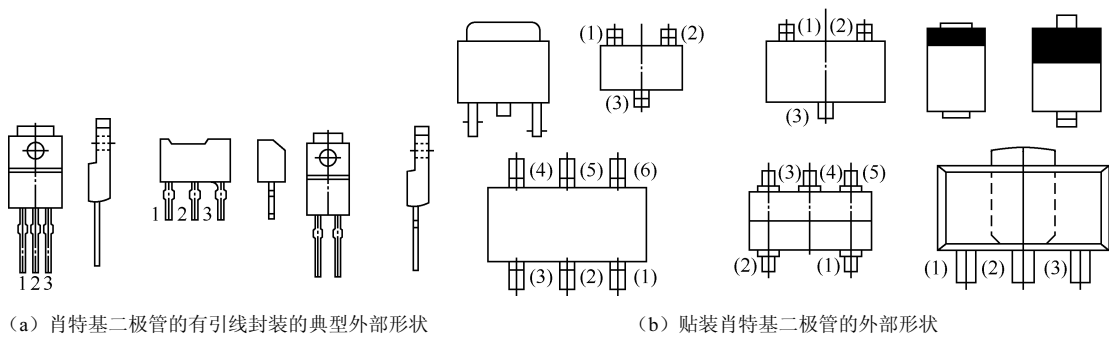


图 7-40 有引脚封装及封装形式

3) 贴装肖特基二极管的内部电路及引脚引出方式

采用贴装（即表面封装）的肖特基二极管有单管型、双管型和三管型等多种封装形式，其引脚引出方式如图 7-41 所示。

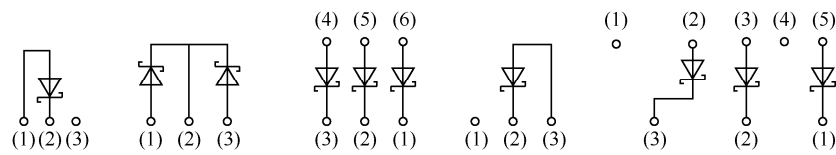


图 7-41 贴装管内部电路及引脚引出方式

7.3.2 工作原理与特性

1)空间电荷区与势垒的形成	肖特基二极管的基本工作原理是基于 N 型半导体中存在着大量自由电子，而金属中的自由电子却极少。当金属与半导体接触时，自由电子会从 N 型半导体向金属扩散，使金属带上负电荷，N 型半导体带正电荷，进而建立起一定宽度的空间电荷区。电场引起的电子漂移运动和浓度不同引起的电子扩散运动达到相对的平衡，便形成了肖特基势垒。
2) 正偏压	在肖特基势垒两端加上正向偏压（阳极金属层接电源正极，N 型半导体基片接电源负极）时，肖特基势垒层变窄、内阻变小，形成从金属到半导体的正向电流。
3) 反向偏压	在肖特基势垒两端加反向偏压时，肖特基势垒则变宽，内阻变大，形成由半导体到金属的较小反向电流。
4) 无偏压	当外加电压为零（即无偏压）时，肖特基势垒处于动态平衡状态。
5) 伏安特性曲线 肖特基二极管的伏安特性曲线如图 7-42 所示。	<div></div> <p>图 7-42 肖特基二极管的伏安特性曲线</p>

7.3.3 特点与参数

1. 主要技术性能特点

<p>(1) 肖特基二极管的正向导通压降一般为 0.3~0.9V，其典型值为 0.4V。</p> <p>(2) 肖特基整流管仅用一种载流子（即电子）输送电荷，不存在电荷储存问题，反向恢复时间可缩短到 10ns 以内。整流电流可达数千安培。</p> <p>(3) 反向耐压值较低，反向击穿电压大多低于 200V，适宜在低电压、大电流情况下工作。但现在已有耐压超过 1kV 的 SBD。</p> <p>(4) SBD 的开关频率高，反向恢复时间短，开关损耗很小，特别适合高频应用。</p> <p>(5) 反向击穿电压比较低。SBD 的反向势垒较薄，表面极易发生击穿。</p> <p>(6) SBD 的反向漏电流较大。</p> <p>(7) 输入与输出间的关系为非线性。</p> <p>(8) 具有单向导电性。</p>
--

2. 肖特基二极管参数

常用肖特基二
极管型号及参数

(1) 贴装肖特基对管常用型号及参数（见表 7-6）。

表 7-6 三种表面贴装肖特基二极管的主要参数

型号	反向峰值电压 (V)	额定正向电流 (A)	峰值电流 (A)	最大正向压降 (V)	最大反向电流 (μA)
RB421D	20	0.1	1	0.55	30
RB420D	25	0.1	1	0.45	1
RB751H	25	0.03	0.2	0.37	1

(2) 有引线封装肖特基二极管的主要参数（见表 7-7）。

表 7-7 有引线封装的几种肖特基二极管的主要参数

型号	反向峰值 电压 (V)	额定正向 电流 (A)	峰值电流 (A)	最大正向 压降 (V)	反向恢复 时间 (ns)
D80-004	40	15	250	0.55	<10
D82-004	40	5	100	0.55	<10
MBR2535	35	30	300	0.75	<10
MBR20200CT	200	10×2		0.9	<10
MBR20100CT	100	10×2		0.85	<10
MBR2045CT	45	10×2		0.63	<10
MBR20150CT	150	10×2		0.85	<10

3. 其他参数

(1) 中频阻抗	当 SBD 施加额定功率时对特定中频信号所呈现的阻抗一般为 200~600 Ω 。
(2) 电压驻波比	电压驻波比（简称驻波比）是指入射电磁波功率跟反射电磁波功率的比值。其值在 1 与无穷大之间。驻波比是 1 表示完全匹配；驻波比无穷大表示全反射，完全失配。驻波比越大，反射功率越大。肖特基二极管的电压驻波比一般小于或等于 2。

7.3.4 应用与检测

1. 应用领域

(1) 在开关电源、变频器、驱动器等低电压、大电流输出场合用作高频整流二极管、续流二极管、保护二极管等。
(2) 在高频段、小信号电路中用作检波或混频二极管等。
(3) 在高速逻辑电路中用作钳位二极管等。
(4) 贴装肖特基二极管体积小、效率高，主要用于手机、智能电话、MP3、MP4 播放器、PDA 和微型硬盘驱动器等便携设备的电流调节、升压和续流电路中。

2. 肖特基二极管的检测


1) 好坏判别	用万用表 $R\times 1\Omega$ 挡测量管子的正反向电阻，若正向电阻值为 $2.5\sim 3.5\Omega$ ，反向电阻值为无穷大，则管子正常、可用；若测得正反向电阻值皆为无穷大或接近于零，说明该管已开路或击穿损坏。
2) 检查管子 的单向导电性	用万用表 $R\times 1\Omega$ 挡测量管子的电阻，如果其正向电阻为几个欧姆，反向电阻接近无穷大，则管子具有单向导电能力。

3. 对管内部连接识别

将肖特基对管的三个引脚（字面朝前）从左至右顺序编上序号左、中、右。将万用表置于 $R\times 1\Omega$ 挡进行测量。

(1) 在红表笔接“中”的情况下，如果左一中、右一中两次均测出电阻值为 $2.5\sim 3.5\Omega$ ，则被测管为共阴极对管，左右引脚为两个阳极，中间引脚为公共阴极。
(2) 如果在左一中引脚间测出为正向电阻，右一中引脚间测出为反向电阻（一般接近无穷大），则被测管为串联对管，且左引脚为阳极，右引脚为阴极，中间引脚为公共引脚。
(3) 如果在左一中引脚间测出为反向电阻，右一中引脚间测出为正向电阻，可判定被测管仍为串联对管，左引脚为阴极，右引脚为阳极，中间引脚为公共引脚。
(4) 在黑表笔接“中”的情况下，如果左一中、右一中两次均测出电阻值为 $2.5\sim 3.5\Omega$ ，则被测管为共阳极对管，左右引脚为两个阴极，中间引脚为公共阳极。

4. 高压肖特基二极管

	<p>碳化硅（SiC）是制作耐压高、正向压降低和开关速度快 SBD 的比较理想的材料。碳化硅高压 SBD 在 300V 的反向偏压下的反向漏电流只有平面型肖特基二极管的 1.5% 左右。有的 SiC SBD 的击穿电压达 1200V，工作电流达 30A。</p> <p>高压 SBD 比低压 SBD 在结构上增加了 PN 结工艺，形成肖特基势垒与 PN 结相结合的混合结构。采用这种结构的 SBD，击穿电压由 PN 结承受。反偏时的击穿电压达到 150~200V。在正向偏置时，高压 SBD 的 PN 结的导通门限电压为 0.6V，而肖特基势垒的结电压仅约 0.3V，故正向电流几乎全部由肖特基势垒供给。</p> <p>例如 STRR162CT，起始电压的典型值为 0.47V，导通电阻 R_D（125℃）小于 6.5mΩ（典型值为 40mΩ），导通损耗低于 0.18W（典型值为 1.14W）。</p> <p>碳化硅二极管多采用 TO-247、TO-220 和 DPAK 封装，主要用在太阳能逆变器、不间断电源（UPS）、三相 SMPS（开关电源）和电机驱动等应用中。</p>
---	--

7.4 PIN 二极管

7.4.1 基本知识

1. 类型

(1) PIN 光电二极管。
(2) PIN 开关二极管。

2. 结构

在掺杂浓度很高的 P 型、N 型半导体之间生成一层本征半导体（即 I 层）。PIN 光电二极管实际上就是把 PN 结的势垒区展宽，即采用较宽的本征半导体层取代势垒区，从而形成 PIN 结构，结构示意图如图 7-43 所示。

(1) 结构示意图（见图 7-43）。

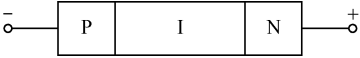


图 7-43 基本结构示意图

(2) 平面型结构。

(3) 台面型结构。

平面型结构和台面型结构的 I 层都可以采用外延技术来形成；台面型结构二极管的工作频率更高。

3. 常见 PIN 二极管（见图 7-44）

半导体 PIN 二极管是在 P 区和 N 区之间夹一层本征半导体而构成的二极管。PIN 中的 I 是“本征”的英文缩写。它同普通 PN 结型二极管有不同的电流电压特性，会在正偏、反偏、低频、高频情况下表现出来。

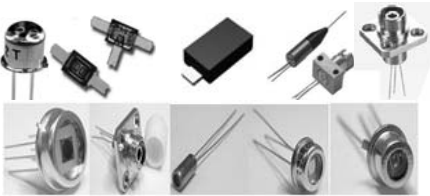


图 7-44 PIN 二极管

4. PIN 光电二极管的工作原理

PIN 光电二极管在有光照射时，光子和半导体的原子相互作用。当入射光子能量足够大时，可在耗尽区或离耗尽区边沿扩散长度内产生电子-空穴对。这种电子-空穴对被外加电场拉开，电子向 N 区移动，空穴向 P 区移动，这就是 PIN 硅光电二极管的工作原理。

5. 性能特点

PIN 管在低频段与普通 PN 结二极管相似，具有单向导电性，可当作整流元件。

(1) PIN 光电二极管将光信号转换成电信号，其光电流随入射光功率的变化而变化，两者的数值为线性关系；当入射光子能量太小时，光电转换就不会发生。

(2) PIN 二极管在高频（频率超过 100MHz）下，随着信号频率的增加，响应速度变快，但整流作用逐渐变弱。

(3) 在零偏压和负偏压下，PIN 二极管可等效为电容加电阻，呈高阻抗状态。

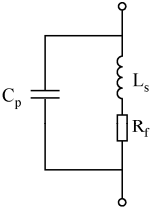
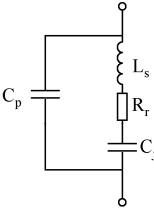
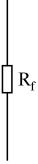
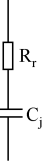
(4) 在正偏压下，PIN 二极管呈现低阻抗状态，等效为小电阻。外加正偏压越大，通过 PIN 管的电流越大，呈现的电阻就越小。所以在正偏压下能用于光能量检测，也可作太阳能电池使用。

(5) 由于正偏置时阻值很小，接近于短路，反偏置时阻值很大，接近于开路，所以可以作为微波开关器件。

(6) 当加反向偏压时，如把工作点取在雪崩击穿的开始区，则可作为雪崩光电二极管（APD）来放大光电流。

(7) 在低偏压或零偏压下，具有较高的灵敏度，适合用于宽带弱光的探测和计量。

6. 等效电路

1) PIN 二极管等效电路	<p>PIN 二极管的等效电路如图 7-45 所示。图中，C_p 为封装寄生电容，L_s 为串联电感，R_f 为正偏压下的总串联电阻，R_r 为反偏压下的总串联电阻，C_j 为耗尽区边界的电荷储存。</p> <div><div><p>(a) 正偏压等效电路</p></div><div><p>(b) 反偏压等效电路</p></div></div> <p>图 7-45 PIN 二极管等效电路</p>
2) PIN 管芯的等效电路	<p>当需要减小由封装带来的寄生参量和电路尺寸，或直接采用 PIN 管芯时，可采用特殊工艺将管芯接入电路。此时管芯的等效电路可简化为图 7-46 所示形式。</p> <div><div><p>(a) 正偏压等效电路</p></div><div><p>(b) 反偏压等效电路</p></div></div> <p>图 7-46 PIN 管芯等效电路</p>

7.4.2 特性与参数

1. 特性

1) 电学特性	(1) 暗电流 暗电流是在无光照时，反向偏置条件下的反向电流。硅 PIN 光电二极管的暗电流很小，一般为几个纳安 (nA)，但随着工作温度的升高，暗电流上升较快。
	(2) 电容 硅光电二极管的电容包括结电容、管壳电容、引线电容、金属化电容等，数值一般为几个到几十皮法 (pF)。
2) 光学特性	(1) 响应率 响应率是指对于给定波长的入射光，每接收单位光功率时二极管输出的光电流。光电流和入射光功率有良好的线性关系。
	(2) 照度与光电流 从低照度到高照度，光电流和照度都有好的线性关系。同样条件下，照度越高，产生的光电流越大。
	(3) 光谱噪声 PIN 硅光电二极管的噪声主要是由暗电流决定的。它的大小直接反映器件对微弱信号的探测能力。
3) 响应特性	响应特性是指光电二极管对快速突变光信号响应的快慢情况。其响应时间一般在纳秒 (ns) 级。响应时间通常用结电容和等效串联电阻的乘积来表示。

4) 高频特性	影响二极管高频性能的势垒电容基本上与外加电压无关, 电容量也基本保持不变。
---------	---------------------------------------

2. 伏安特性曲线

PN 结呈现为一个纯电阻（即动态射频电阻） R_F ，阻值由直流偏置决定。

(1) 正偏压特性

当 PIN 结加正偏压时，伏安特性曲线呈指数式上升，与一般 PN 结的伏安特性曲线基本相同。所以 PIN 结也与一般 PN 结一样具有良好的单向导电性。如图 7-47 所示，加正向电压时呈现低电阻，其值一般为 $0.1 \sim 10\Omega$ ，为接通（ON）状态。在正向电压固定不变时，温度越高，正向电流越大。

总之，PIN 二极管是用加顺向或逆向偏压的办法改变其高频信号阻抗，所以能够用通/断（即 ON/OFF）的方法来控制通过 PIN 二极管的高频信号。

(2) 反偏压特性

当 PIN 结加反偏压时，I 层的厚度基本上不随反向电压变化而变化，PIN 结的反向电流（即反向饱和电流）也与反向电压无关，如图 7-48 所示，表现为高阻抗状态，即变成断开（OFF）状态，电阻值为 $1.0 \sim 100\Omega$ 。当反向电压固定不变时，温度越高，反向电流越大。

(3) 特性曲线

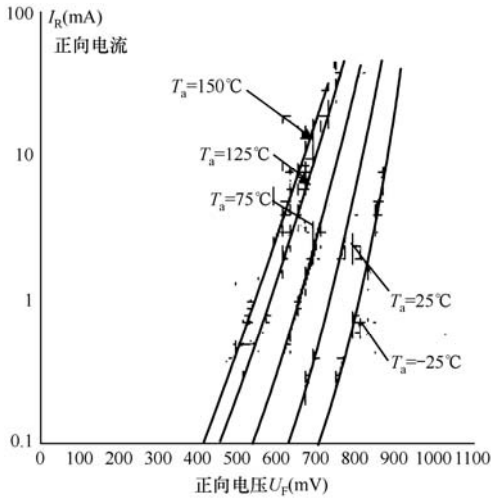


图 7-47 正向伏安特性曲线

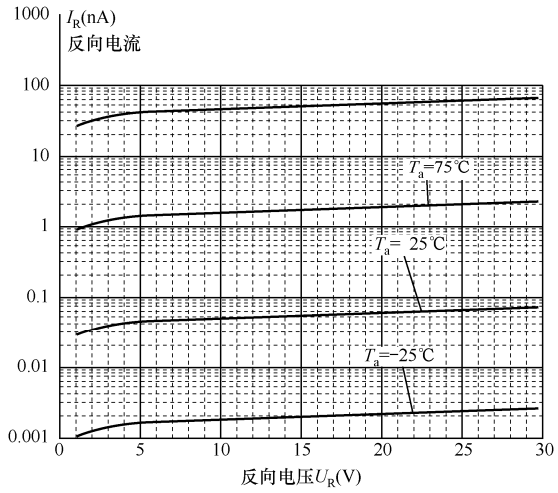


图 7-48 反向伏安特性曲线

3. 主要参数

1) PIN 开关二极管的主要参数	(1) 插入损耗 插入损耗是指 PIN 二极管作为开关，在导通状态下信号通过时所产生的衰减（即损耗），这个衰减越小越好。
	(2) 隔离度 PIN 二极管作为开关，在断开后阻值的大小用隔离度表示。实际中隔离度越大越好。
	(3) 开关时间 PIN 二极管作为开关，由于电荷的存储效应，PIN 管的通-断和断-通转换需要一个过程，这个过程所需时间称为开关时间。开关时间越短越好。

1) PIN 开关二极管的主要参数	<p>(4) 承受功率</p> <p>承受功率是指 PIN 二极管作为开关应用时, 在给定工作条件下开关能够承受的最大输入功率。</p>
	<p>(5) 电压驻波系数</p> <p>电磁波从甲介质传导到乙介质时, 由于介质不同, 波的能量会有一部分被反射。这种反射波与入射波叠加后形成的波称为驻波。电压驻波系数(又称电压驻波比)是指驻波的电压峰值与电压谷值之比, 理想的比值为 1:1。电压驻波系数反映着 PIN 二极管输入与输出的匹配情况。</p>
	<p>(6) 谐波</p> <p>PIN 二极管用作开关时会产生谐波, 如用在宽带场所, 产生的谐波频率可能在使用频带内引起干扰, 所以产生的谐波越小越好。</p>
2) PIN 光电二极管主要参数	<p>(1) 波长响应范围(即波长范围)</p> <p>硅 PIN 光电二极管的波长响应范围为 0.5~1μm; 锗(Ge) PIN 和 InGaAs PIN 光电二极管的波长响应范围约为 1~1.7μm。</p>
	<p>(2) 灵敏度(即响应度)</p> <p>灵敏度是指入射到光电二极管上的单位光功率所产生的光电流, 单位是 A/W(安/瓦)。这是描述光电二极管能量转换效率的一个参量, 其值随着波长的增大而增大。</p>
	<p>(3) 响应速度</p> <p>响应速度通常用响应时间(上升时间和下降时间)来表示。时间越短, 响应速度越快。例如, 发光二极管的型号为 PDS443 时, 表明这是砷化镓 PIN 发光二极管, 其波长范围是 1000~1650nm; 中心波长为 1300~1600nm; 灵敏度是 0.90A/W(at 1310nm); 最大反向电流为 5mA; 最大光功率是 10mW。</p>

7.4.3 典型应用

1. 应用领域

PIN 二极管应用很广泛, 从低频到高频都可使用。

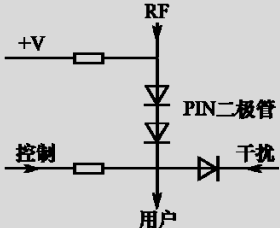
作射频开关	PIN 二极管的射频电阻与直流偏置电压有关, 所以可以用作射频开关。在作为射频开关的电路中, 二极管加正偏压时接通(也可以称短路); 加反偏压或零偏压时断开。
作射频衰减器和调制器	PIN 结二极管的射频电阻随直流偏置电压的改变而连续变化, 改变直流偏置电压就可以实现对射频信号的衰减或调制。
作射频限幅器	PIN 结二极管在射频电路中, 在射频信号低于临界电平时犹如一个纯电阻(即射频电阻); 当高于临界电平时犹如一个直流电阻, 可以用来限制过大的发射功率, 保护器件不被损坏。
作大功率整流管	PIN 二极管的击穿电压很高, 承受的工作电压也很高; 工作时正向压降又很小, 是一种比较理想的大功率整流管。
光电探测器	PIN 二极管作为光电探测器使用时有较高的灵敏度, 是最常用的光探测器之一。

2. PIN 二极管的驱动方式

专用驱动	在开关电路中，每个 PIN 二极管都有自己的驱动器或开关驱动电路，用来提供受控正向偏置电流、反向偏置电压以及控制信号与一个或多个 PIN 二极管之间的激活接口。驱动功能可以采用分立元件设计或专门 IC 来实现。
运放驱动	使用运算放大器、钳位放大器、差分放大器等特殊放大器可作为备选方案，代替分立 PIN 二极管驱动电路和昂贵的 PIN 二极管 IC 驱动器。运算放大器具有宽的带宽和充足的稳态电流驱动 PIN 二极管。三种常用的组成 PIN 驱动器电路的运算放大器或特殊放大器是 AD8037、AD8137 和 ADA4858-3。这些电路可用于单刀双掷（SPDT）PIN 二极管开关。

3. PIN 二极管开关电路控制方式

典型的 PIN 二极管开关电路原理图如图 7-49 所示。

1) 直流控制	 <p>图 7-49 PIN 二极管开关原理图</p>	直流控制方式是把直流信号（高电平或低电平）加到“控制”端，加高电平时 PIN 二极管关断，加低电平时二极管导通。这样就可以控制射频信号通道的“通”和“断”。这种方式的优点是干扰少，并对上下行信号同时进行关断或开通，适用于射频信号双向传输产品与系统。
2) 交流控制		交流控制方式是把交流信号（方波、正弦波或锯齿波等）加到“控制”端，用以控制开关的通断以保证射频信号 RF 通过、阻断。

7.5 其他二极管

7.5.1 隧道二极管

1. 符号

(1) 文字符号

隧道二极管的文字符号为 VD 或 TD。

(2) 图形符号

隧道二极管的图形符号如图 7-50 所示。

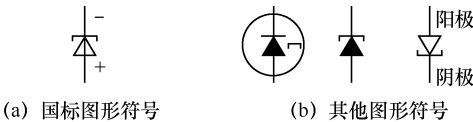


图 7-50 隧道二极管图形符号

2. 常见隧道二极管

隧道二极管（又称江崎二极管）是采用砷化镓或锑化镓等材料、依据 PN 结的隧道效应制成的半导体二极管。其 P 区和 N 区都是高掺杂（即高浓度杂质）的半导体材料。它是以隧道效应电流为主要电流分量的晶体二极管。隧道二极管如图 7-51 所示。



图 7-51 隧道二极管

3. 隧道效应

当在中间夹有极薄绝缘层两金属片的两端施加电压后会形成势垒，导体中有部分电子可以从绝缘层一侧穿过势垒到达另一侧，这种物理现象就是隧道效应。

4. 隧道电流

由重掺杂的 P 型半导体和 N 型半导体形成的 PN 结可称为隧道结。在无外加电压时，隧道结处于热平衡状态。由于杂质浓度大，势垒区的厚度很薄，N 区的电子可穿过势垒区到 P 区，P 区空穴也可穿过势垒区到 N 区，于是就产生了隧道电流。同样情况下，隧道长度越短，载流子穿过隧道的概率越大，隧道电流也越大。

5. 隧道二极管工作原理

突变结	隧道二极管的 PN 结是突变结，很薄，两侧为杂质浓度很高的半导体。
隧道电流和齐纳电流	在外电场作用下，N 区内积聚的大量自由电子就像火车通过隧道那样穿透势垒（即迅速冲破 PN 结势垒）产生隧道电流，这个电流随势垒厚度和载流子浓度梯度呈指数规律下降。同时 P 区的载流子产生与隧道电流方向相反的齐纳电流。两种电流的交叠作用是隧道二极管电流的重要特征。

6. 伏安特性曲线

隧道二极管的伏安特性曲线如图 7-52 所示。曲线呈 S 形，曲线中最大电流点 P 为峰点，最小电流点 V 为谷点。

1) 外加正电压

当隧道二极管加正向电压时，在开始时段，管中的电流随电压的增加而迅速增大，如曲线的 OP 段所示。

当电压超过 U_p 后继续增大时，电流开始突然变小，如曲线 PV 段所示。外加电压再继续增大时，电流又急剧变大，如曲线 VF 段所示。

图 7-52 隧道二极管伏安特性曲线

2) 外加零电压 当外加电压为零值时，电流也为零。 3) 在峰点和谷点之间（图中曲线 PV 段）为隧道二极管的负阻工作区，呈现负阻特性，即随着外加正向电压的增大，电流快速减小。	图中，P 点对应的 I_P 为峰点电流， U_P 为峰点电压；V 点对应的电流 I_V 为谷点电流， U_V 为谷点电压。
--	---

7. 隧道二极管的主要参数

例如，国产型号 2BS4A 隧道二极管的峰点电压 (U_P) 为 80mV，峰点电流 (I_P) 为 4mA，峰谷电流比小于 5；谷点电容 (C_V) 一般在 10~15μF 之间，谷点电压 (U_V) 为 280mV。

峰点电压 (U_P)	隧道二极管的峰点电压 U_P 一般为几十毫伏。
谷点电压 (U_V)	隧道二极管的谷点电压 U_V 通常为几百毫伏。
峰点电流 (I_P)	隧道二极管的峰点电流 I_P 一般为几个毫安。
谷点电流 (I_V)	隧道二极管的谷点电流 I_V 一般为几百微安。
峰谷电流比	隧道二极管的峰谷电流比是指二极管的峰点电流与谷点电流的比，其值一般为 5~6。该比值越大越好。
谷点电容 (C_V)	隧道二极管的谷点电容值通常在几微法至几十微法之间，该电容值越小越好。

8. 三种材料隧道二极管的特性参数比较（见表 7-8）

表 7-8 锗、砷化镓和硅隧道二极管的典型特性参数比较

材料 参数	Ge（锗）	GaAs（砷化镓）	Si（硅）
I_{pe}/I_v	10~15	10~20	3~5
U_{pe} (mv)	40~70	90~120	80~100
U_v (mV)	250~350	450~600	400~500

9. 磁性隧道二极管

1) 结构 磁性隧道二极管是自旋式二极管，由两层铁磁性金属夹一较薄的非磁性绝缘层构成。
2) 工作原理 工作时，第一层铁磁体使流入的电子自旋极化，当另一层铁磁体的磁化方向与第一层铁磁体的方向相同时，自旋极化的电子通过隧道效应到达第二层铁磁体，形成较大的电流，为开通状态；当第二层铁磁体的磁化方向与第一层铁磁体的方向相反时，大大减弱了自旋极化电子的隧道效应，通过的电流很小，为关断状态。电流通断两种状态的实现和相互转换是磁性随机存取存储器（MRAM）的理论基础。

10. 性能特点

隧道二极管具有开关特性好、速度快、工作频率高、功耗小、噪声低、抗辐射能力强等

5. 模块与内部连接

双管的引脚引出方式又分为共阳极和共阴极两类。

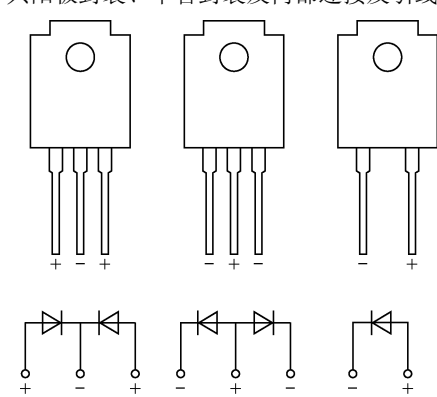
1) 模块 大 功 率 快 恢 复 二 极 管 有 单 管 和 双 管 两 种 封 装。	通常，工作电流为 5~20A 的快恢复二极管多采用塑料封装，电流在 20A 以上的多采用顶部带金属散热片的塑料封装，电流在 5A 以下的一般采用 DO-41、DO-15 或 DO-27 等塑料封装。
2) 外形及内部连接	<p>双管共阴极封装、共阳极封装、单管封装及内部连接及引线如图 7-55 所示。</p>  <p>(a) 共阴极连接 (b) 共阳极连接 (c) 单管封装</p>

图 7-55 封装及内部连接

6. 性能特点

开关特性	开关速度快，开关特性好，适合高频应用。
反 向 恢 复 时间	反向恢复时间是指电流通过零点由正向转换到规定低值的时间间隔，一般为几十至几百纳秒。
正 向 工 作 电流	快恢复二极管的正向工作电流（又称平均整流电流）通常在几安至几百安之间，但多数小于 100A。
最大正向压降	快恢复二极管的最大正向压降（又称正向工作电压）较低，一般小于 1.8V。
反 向 击 穿 电压	二极管的反向击穿电压（又称最大反向电压、耐压、反向峰值电压）一般在几十到一千伏之间。
体积小	便于安装。

7. 技术参数

1)常用小功率快恢复二极管主要技术参数	常用小功率快恢复二极管有 FR 系列、PFR 系列等，其主要参数见表 7-9。					
	表 7-9 几种小功率快恢复二极管的主要技术参数表					
	参数 型号	反向击穿 电压 (V)	最大正向 电压 (V)	正向工作 电流 (A)	反向漏电 电流 (μA)	反向恢复 时间 (μs)
	FR-100/PFR-100	25	≤1.8	1	≤10	≤0.85
	FR-101/PFR-101	50	≤1.8	1	≤10	≤0.85

1)常用小功率快恢复二极管主要技术参数	(续表)							
	参数 型号	反向击穿电压 (V)	最大正向电压 (V)	正向工作电流 (A)	反向漏电流 (μA)	反向恢复时间 (μs)	峰值电流 (A)	
	FR-106/PFR-106	800	≤1.8	1	≤10	≤0.85	30/25	
	FR-107/PFR-107	1000	≤1.8	1	≤10	≤0.85	30/25	
	FR-150/PFR-150	25	≤1.8	1.5	≤10	≤0.85	50	
	FR-153/PFR-153	200	≤1.8	1.5	≤10	≤0.85	50	
	FR-154/PFR-154	200	≤1.8	1.5	≤10	≤0.85	50	
	FR-206	800	≤1.8	2	≤10	≤0.85	50	
	FR-207	100	≤1.8	2	≤10	≤0.85	50	
	FR-300	25	≤1.8	3	≤10	≤0.85	50	

2) 常用中、大功率快恢复二极管的技术参数 (见表 7-10 (a))	表 7-10 (a) 中、大功率快恢复二极管的主要技术参数表					
	参数 型号	反向击穿电压 (V)	平均整流电流 (A)	峰值电流 (A)	反向恢复时间 (μs)	最大电压 (V)
	RC503C-02	200	5	50	35	0.98
	RC503D-02	200	5	50	35	0.98
	C20-04	400	5	70	0.4	—
	C92-02	200	10	50	0.035	—
	MUR1680A	800	16	100	0.035	—
	MUR3040PP	400	30	300	0.035	—
	MUR30100	1000	30	400	0.035	—
	CTL12S	200	5	—	0.05	0.98

3)常见快恢复二极管模块主要参数 (见表 7-10 (b))	表 7-10 (b) 常见快恢复二极管模块的主要参数表					
	型号	电流 (A)	电压 (V)	压降 (V)	恢复时间(ns)	工作频率 (kHz)
	MZC100TS60S	2×100	600	1.36	132	5~50
	MZC400TS60S	2×400	600	1.4	200	5~50
	MZK100TS60S	2×100	600	1.36	132	5~50
	MZC400TS120S	2×400	1200	1.85	240	5~40
	MZK300TS120S	2×300	1200	1.85	231	5~40
	MZK400TS120S	2×400	1200	1.85	240	5~40
	MZD900DD60S	900	600	1.41	270	5~50
	MZD450DD120S	450	1200	1.76	250	5~40
	MZD600DD120S	600	1200	1.85	260	5~40
	MZD800DD120S	800	1200	1.85	280	5~40

4)常用贴装式快恢复二极管 (见表 7-11)	表 7-11 贴装式快恢复二极管的主要参数表								
	参数 型号	最大反向电压	正向工作电流		峰值电流	最大反向电流	最大正向电压		最大反复时间
		V	A	℃	A	μA	A	V	ns
	UF2A	50	2.0	55	50	5.0	2.0	1.0	50
	UF2B	100	2.0	55	50	5.0	2.0	1.0	50
	US2D	200	2.0	55	50	5.0	2.0	1.0	50
	UF2G	400	2.0	55	50	5.0	2.0	1.4	50
	UF2J	600	2.0	55	50	5.0	2.0	1.7	75
	UF2K	800	2.0	55	50	5.0	2.0	1.7	75
	UF2M	1000	2.0	55	50	5.0	2.0	1.7	75

8. 超快恢复二极管



超快恢复二极管（缩写 **SRD**）是一种新型电力电子半导体器件，其反向恢复时间一般小于几十纳秒。可广泛用于开关电源、脉宽调制器（**PWM**）、不间断电源（**UPS**）、交流变频调速、高频加热等装置中，用作高频、大电流的续流二极管或整流管。

9. 应用

快恢复二极管主要用作开关电源、变流器、电焊机、开关电源、**PWM** 脉宽调制器、电机控制、**UPS** 电源等设备的高频整流二极管、续流二极管、阻尼二极管等。

7.5.3 双向二极管

1. 符号

文字符号	双向二极管的文字符号为 VD 或 DIAC 。
图形符号 (见图 7-56)	<div><div></div><div>(a) 国标图形符号</div><div></div><div>(b) 其他图形符号</div></div> <div>图 7-56 双向二极管图形符号</div>

2. 等效电路

双向二极管可等效为基极开路、集电极与发射极对称的 **NPN** 型半导体三极管，如图 7-57、图 7-58 所示。

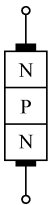


图 7-57 等效内部结构

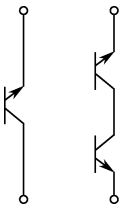


图 7-58 等效电路

3. 常见双向二极管

双向二极管（又称二极管交流开关、双向触发二极管、硅双向电压开关二极管，简称 **DIAC**）是一种具有对称性的半导体二极管，如图 7-59 所示。



图 7-59 双向二极管

4. 工作原理

双向触发二极管实际等效于两只反向并联、各反串了一只二极管的稳压二极管。不论是电源的正半周还是负半周，当电压达到一定值后，总会有其中一只稳压管击穿，即双向触发二极管导通。正向和反向均具有相同的负阻开关特性。

当阳极加正电压、阴极接地时，形成 PNPN 四层二极管，产生伏安特性的正向部分；当阳极加负电压、阴极接地时，构成 NPNP 四层二极管，并产生伏安特性的反向部分。

为了提高双向开关管的阻断电压，采用了阴极短路技术。

5. 伏安特性曲线（见图 7-60）

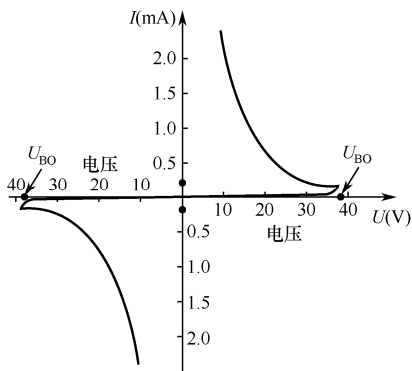


图 7-60 双向二极管伏安特性曲线

- (1) 双向二极管的正反向伏安特性曲线是完全对称的。
- (2) 当二极管两端的电压低于正向转折电压时，二极管呈高阻状态；当两端的电压大于正向转折电压时，二极管被击穿、导通，进入负阻区。同样，当施加的电压低于反向转折电压时，二极管呈高阻状态；当反向电压超过反向转折电压时，二极管也会被击穿、导通，进入负阻区。正向和反向都具有负阻特性。

6. 双向二极管的主要参数

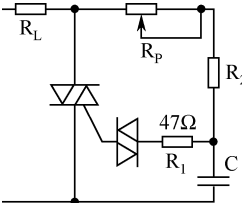
1) 正向转折电压 (U_{BO})	双向二极管的正向转折电压（也称正向触发电压、耐压）是指在二极管不被击穿情况下所能承受的最高正向电压。不同双向二极管的耐压值也不同，通常分为 20~60V、100~150V、200~250V 三个档次。
2) 对称性	转折电压的对称性是指正向转折电压与反向转折电压的绝对值的差值，用 ΔU_B 表示，一般要求 ΔU_B 的值小于 2V。

7. 高压触发管

高压触发管（也称双向开关触发器件）是一种高压双向触发开关。可将触发电压和电流的值成倍放大，产生高压脉冲。 高压触发管主要应用于灯的起辉点火、燃	表 7-12 常见型号高压触发管基本参数表			
	型号	关断电压 U_{DRM} (V)	最小开启电压 $U_{BO}(\min)$ (V)	最大开启电压 $U_{BO}(\max)$ (V)
	K1500E70	±90	140	170
	K2000E70	±180	190	215
	K2500E70	±190	240	280
	K1200G	±90	110	125
				封装
				TO-92
				TO-92
				TO-92
				DO-15

气点火、空调控制电路、电子镇流器等。其常见型号和基本参数见表 7-12。	续表			
	型号	关断电压 U_{DRM} (V)	最小开启电压 U_{BO} (min) (V)	最大开启电压 U_{BO} (max) (V)
	K1500G	±90	140	170
	K2200G	±180	205	230
	K2500G	±190	240	280
	K2200F1	±180	205	230
	K2401F1	±190	220	250
	K3000F1	±190	270	330

8. 应用

1) 应用领域	双向二极管常用以触发双向晶闸管、作张弛振荡器或过压保护器件。
2) 典型应用电路 双向二极管的典型应用电路如图 7-61 所示。图中，双向二极管平时处于截止状态，只有当外加电压（不论正向、反向）高于双向二极管的击穿电压时，双向二极管才被击穿导通。	<div></div> <p>图 7-61 双向二极管触发电路</p> <p>图中，电路通电后，电流便通过 R_L、R_p、R_2 向电容 C 充电；当电容 C 上的电压高于双向二极管的击穿电压时，电容 C 便通过限流电阻 R_1、双向二极管向晶闸管控制极放电，触发双向晶闸管。</p> <p>调节电位器 R_p 的阻值可改变电容 C 的充电速度，同时也改变了双向晶闸管的导通角。由于双向二极管在正反向电压下均能工作，所以双向二极管触发电路在交流电的正负两个半周内都能触发晶闸管。负载电阻 R_L 上的电压随晶闸管导通角的变化而变化。</p> <p>双向二极管触发电路省去了整流电路和滤波电路，使触发电路变得简单、可靠。</p>

9. 检测

1) 好坏判别	(1) 损坏 置万用表于 $R \times 1k$ 或 $R \times 10k$ 挡，测量双向二极管正反向电阻值。正常双向二极管的正反向电阻值均应为无穷大。若测得正反向电阻值均很小或为零，则说明该二极管已被击穿损坏。
	(2) 漏电 置万用表于 $R \times 1k$ 或 $R \times 10k$ 挡，测量双向二极管正反向电阻值，如两阻值皆为无穷大，则交换表笔后再进行测量，若万用表指针向右摆动，说明被测管漏电。
2) 性能检测	(1) 将万用表置于交流电压挡，测出交流电源电压 U 。
	(2) 将被测双向二极管串入万用表的交流电压测量回路后，接通电源电压，读出电压值 U_1 ，再将双向触发二极管的两极对调连接后并读出电压值 U_2 。

2) 性能检测	(3) 若 U_1 与 U_2 的电压值相同但与 U_0 不同时, 说明该双向二极管的导通性能的对称性良好; 若 U_1 与 U_2 的电压值相差较大时, 则表明该双向二极管的导通性不对称。
	(4) 若 U_1 、 U_2 电压值均与 U_0 值相等时, 表明该双向触发二极管内部已短路损坏。
	(5) 将万用表置于相应的直流电压挡, 测试电压由摇表提供。在测试时, 摇动摇表, 分别测出双向管的正向转折电压值和反向转折电压值。比较两者的大小, 绝对值之差一般为 $2\sim 6V$, 差值越小, 说明被测二极管转折电压的对称性越好。

7.5.4 其他特殊二极管

1. 恒流二极管

1) 符号	(1) 文字符号	恒流二极管的文字符号是 VDH 或 CRD。
	(2) 图形符号 图形符号如图 7-62 所示。	<div><div><div>阴极</div><div>VDH</div><div>阳极</div></div><div><div>-</div><div>+</div></div><div><div>←</div><div>电流方向</div></div><div>(a) 符号一</div></div> <div><div>阳极</div><div>↓</div><div>阴极</div></div> <div>(b) 符号二</div>

图 7-62 图形符号

4) 主要参数 恒流二极管 (又称电流调节二极管, 缩写 CRD) 属于两端结型场效应恒流器件。它具有很高的动态阻抗, 能在很宽的工作电压范围内输出恒定的电流。	(1) 恒定电流 (I_H): 恒流二极管的恒定电流一般为 0.2~6mA。			
	(2) 起始电压 (U_S): 起始电压表示二极管进入恒流工作区所需要的最小电压。			
	(3) 正向击穿电压 (U_{BO}): 恒流二极管的正向击穿电压通常为 30~100V, 二极管一旦被击穿, 就失去恒流作用。			
	(4) 动态阻抗 (Z_H): 动态阻抗是指工作电压变化量与恒定电流值变化量之比。恒流管的 Z_H 越大越好, 当 I_H 较小时, Z_H 可达数兆欧, I_H 较大时 Z_H 降至数百千欧。			
	(5) 电流温度系数 (α_T): 电流温度系数是指恒定电流的相对变化量与温度变化量的比值。 α_T 为正值说明恒流管具有正的电流温度系数; α_T 为负值说明恒流管具有负的电流温度系数。如果管子的 α_T 值既可为正, 又可为负, 通常就用绝对值表示。			
	(6) 结电容: 恒流二极管在零偏置下的结电容约为 10pF, 进入恒流区后降至 3~5pF, 其频率响应大致为 0~500kHz。当工作频率过高时, 由于结电容的容抗迅速减小, 使动态阻抗降低, 导致恒流特性变差。			
5) 产品及特点	(1) 产品系列: 常用国产的恒流二极管是 2DH 系列 (可细分为 2DH0、2DH00、2DH100、2DH000 四个子系列)、2DHLxx、2THLxxx 系列和 SDHxxx 系列。			
	(2) 性能特点: 起始稳流电压较低; 动态阻抗高; 具有负温度系数; 可并联连接以扩大稳流范围。			
6) 2DH 系列 器件参数 2DH 系列二极管常见型号的主要参数见表 7-13。	表 7-13 2DH 系列二极管常见型号的主要参数			
	型号	恒定电流 (mA)	启动电压 U_S (V)	动态电阻 (m Ω)
	2DH01	1 \pm 0.05	<0.8	≥ 8
	2DH02	2 \pm 0.05	<1.5	≥ 5
	2DH05	5 \pm 0.05	<2	≥ 2.5
	2DH08	8 \pm 0.05	<3	≥ 1.5
	2DH09	9 \pm 0.05	<3	≥ 1
	2DH1	1 \pm 0.05	<3	≥ 1
	2DH2	2 \pm 0.05	<3	≥ 0.5
	2DH3	3 \pm 0.05	<3	≥ 0.4
	2DH4	4 \pm 0.05	<3	≥ 0.3
	2DH5	5 \pm 0.05	<4	≥ 0.25
	2DH7	7 \pm 0.05	<5	≥ 0.15
7) 常见其他 恒流二极管的 主要参数 常见其他恒流二极管的主要参数见表 7-14。	表 7-14 其他常见恒流二极管主要参数			
	封装 (型号)	恒定电流 (mA)	启动电压 (V)	耗散功率 (W)
	SOD-123	20	2.5	0.6
		30	2.5	0.6
	P-6020	350	1.0	2.0
	D-PAK	350	7.0	11
	SOD-106	8	3.1	0.6
		10	3.5	0.6
		12	3.8	0.6
		15	4.3	1
	SOD-89 D-PAK (CL1)	20	5.0	0.9
	D-PAK (NSI5035)	350	5.0	5.8

8) 应用

恒流二极管具有恒流性能好、价格较低、使用简便等特点，已被广泛用于恒流源、稳压源、放大器以及电子仪器的保护电路中的恒流源或恒流偏置元件。

利用恒流二极管驱动 LED 管驱动电路如图 7-65 所示。

(1) 恒流二极管驱动 LED

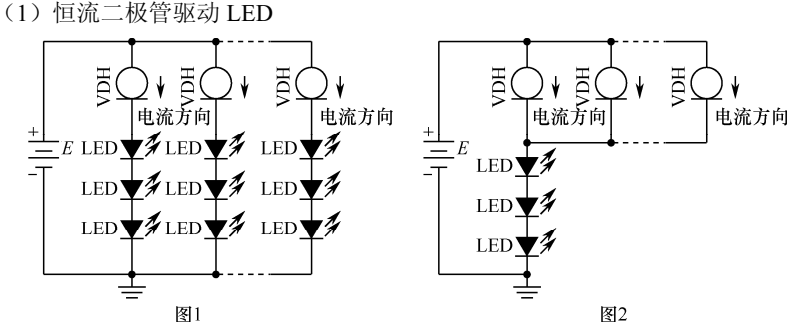


图 7-65 (a) 利用恒流二极管驱动 LED 的电路

图 2 为三个恒流二极管并联。并联后，电路工作电流为单个恒流二极管恒定电流的 3 倍，以满足 LED 工作的需要。如果同恒流二极管并联一个电阻，在输入电压变化较大时可起补偿作用，保持电流的基本稳定，电阻阻值可视实际情况适当变动。电路中串联的 LED 个数主要取决于电源电压的高低。

(2) 恒流二极管驱动彩灯

由于 RGB 三色 LED 的 U_F 值相差较大，阵列中个数相同时总 U_F 值也不同。用恒流二极管为 RGB 三色 LED 阵列提供恒定电流，采用脉冲控制信号，可简化常规调试过程，提供更精准的恒流驱动，更容易获得预期效果。

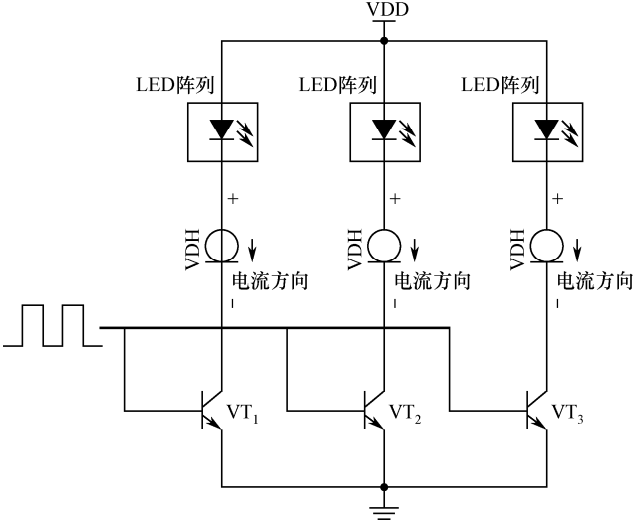


图 7-65 (b) 利用恒流二极管驱动 RGB 灯电路

2. 阻尼二极管

符号	阻尼二极管（又称高反压开关二极管）是一种特殊的高频高压整流二极管。其文字符号和图形符号与普通二极管相同。
性能特点	具有反向工作电压高、峰值电流大、正向电压降小、工作频率高、响应快、能承受较高的反向击穿电压和较大的峰值电流的特点，可吸收静电放电较大的电能。

正向特性曲线
(见图 7-66)

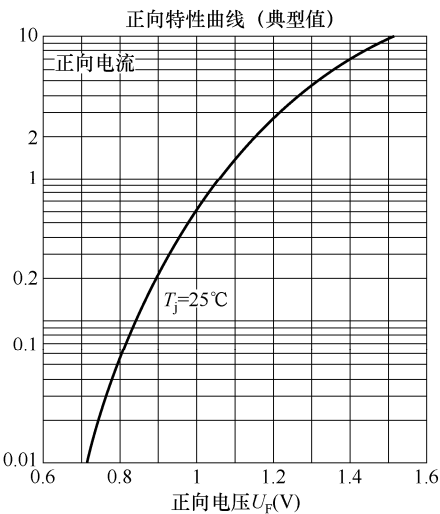


图 7-66 正向特性曲线

外形（见
图 7-67 所示）

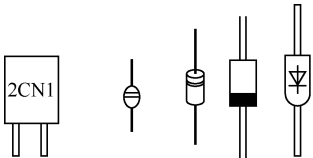


图 7-67 阻尼二极管的外部形状

产品系列 常见阻尼二极管有 2AN、2CN、2DN 系列、TVR 系列、RU 系列和 BS 系列等。

常见器件
参数(见表 7-15)

表 7-15 是部分阻尼二极管的主要参数

参数 型号	反向击穿 电压 (V)	正向压降 (V)	正向平均整流 电流 (A)	峰值 电流 (A)	反向漏 电流 (μA)	反向恢复 时间 (μs)
2AN1	≥140	0.7	1	8	≤400	≤2
2AN1B	≥140	0.75	1.5	5	≤400	≤2
2AN2	≥240	0.75	1	5	≤800	≤2
2AN2A	≥120	0.55	1.5	7	≤400	≤2
2CN83	≥200	≤0.65	0.3	3	≤10	≤2
2CN85	≥200	≤0.65	0.3	3	≤10	≤2
2DNC	≥200	≤1.3	1	5	≤10	≤2
2DND	≥400	≤1.3	1	5	≤10	≤1.25
2DNE	≥600	≤1.3	1	5	≤10	≤1.25
BS5D	≥200	1	1	5	≤10	≤5
BS4D	≥200	1	1	5	≤10	≤6

应用

阻尼二极管主要用作 UBS 保护、行扫描、升压整流二极管、高频高压整流二极管和大电流开关二极管等。

3. 磁敏二极管


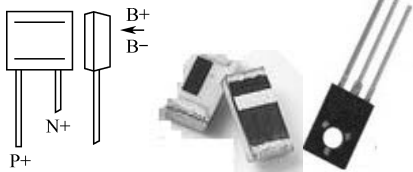
1) 符号	<p>磁敏二极管的文字符号与普通二极管相同；图形符号如图 7-68 所示。</p> <div></div> <p>图 7-68 磁敏二极管的图形符号</p>
2) 外形	<p>常见磁敏二极管的外形如图 7-69 所示。长引脚为正极，短引脚为负极。图中箭头所指的凸出面为磁敏感面。</p> <div></div> <p>图 7-69 常见磁敏二极管的外部形状</p>
3) 磁敏二极管工作原理	<p>(1) 磁敏二极管为 PIN 结构，在 P 区与 N 区之间有一个空间电荷区（即 I 区）。它是利用电子与空穴双重注入及复合效应工作的。</p>
	<p>(2) 在管芯的 P 区接电源正极，N 区接电源负极（即加正偏压）的情况下，当没有外加磁场时，大部分的空穴和电子分别流入 N 区和 P 区而产生电流，只有很少一部分载流子复合。此时，电流很小，P 区和 N 区间有固定的阻值，器件呈稳定状态，如图（a）所示。</p>
	<p>(3) 在正偏压下，给磁敏二极管外加一个正向磁场时，在磁场作用下的空穴和电子的复合速率大大增加，使二极管的电阻增大、电流减小；磁场强度越大，电流越小，如图（b）所示。</p>
	<p>(4) 在正偏压下，给磁敏二极管施加反向磁场时，其结果与加正向磁场时的情况恰恰相反，导致二极管的电阻减小，电流增大。反向磁场强度越大，电流也越大，如图（c）所示。</p>
4) 主要参数	<p>由此可知，磁敏二极管在受方向不同的磁场作用时，电阻率的变化方向也不同，且均随磁场强度的变化而变化。正是利用这一特性实现了磁-电信号的转变。</p>
	<p>(1) 灵敏度</p> <p>当外加磁感应强度 B 为 $\pm 0.1\text{T}$（特）时，输出端电压增量与电流增量之比称为灵敏度。国产 2ACM 型磁敏二极管的灵敏度一般为 800mV/mA。</p>
	<p>(2) 工作电压</p> <p>工作电压是指磁敏二极管在零磁场时的电压值。国产 2ACM 型磁敏二极管的工作电压范围通常为 $4\sim 9\text{V}$。</p>
磁敏二极管的主要参数有灵敏度、工作电压 U_0 、工作电流 I_0 、使用频限 f_0 等。	<p>(3) 工作电流</p> <p>工作电流是指磁敏二极管在零磁场时的电流值。国产 2ACM 型磁敏二极管的工作电流范围为 $1.0\sim 2.5\text{mA}$。</p>

表 7-16 2ACM 系列磁敏二极管主要参数

型号	最大耗散 功率 P_M (mW)	工作电压 U_I (V)	工作电流 I_I (mA)	反向漏电 流 I_n (μ A)	磁场方向变化与 工作电压变化量	
					ΔU_+ (V)	ΔU_- (V)
2ACM-1A	50	4~6	2~2.5	200	<0.6	≤ 0.4
2ACM-1B					≥ 0.6	≥ 0.4
2ACM-1C					>0.8	>0.6
2ACM-2A		6~7	1.5~2		<0.6	<0.4
2ACM-2B					≥ 0.6	≥ 0.4
2ACM-2C					>0.8	>0.4
2ACM-3A		7~9	1~1.5		<0.6	<0.4
2ACM-3B					≥ 0.6	≥ 0.4

5) 2ACM 系列磁敏二极管主要参数 (见表 7-16)

6) 电压输出特性
磁敏二极管的电压输出特性如图 7-70 所示。
在弱磁场下, 输出电压与磁感应强度成正比, 为线性关系。当磁场足够强时, 输出电压与磁感应强度呈非线性关系。

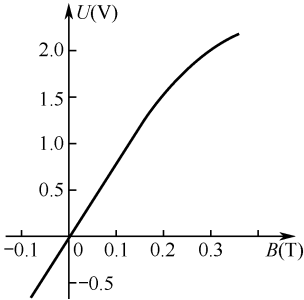


图 7-70 磁敏管的电压输出特性

7) 伏安特性曲线
磁敏二极管的伏安特性曲线如图 7-71 所示。图中, 不同的磁感应强度 B 对应不同的伏安特性曲线, 线段 AB 为负载线, T 为磁感应强度单位特斯拉 (简称特)。
由图可以看出, 通过磁敏二极管的电流越大, 在同一磁场作用下, 输出电压越高, 灵敏度也越高。在负向磁场作用下, 其电阻小, 电流大; 在正向磁场作用下, 其电阻大, 电流小。

- (1) 在弱磁场 (或无磁场, 或 $B=0$) 作用下, 输出电压 U 与磁感应强度 B 成正比, 即呈线性关系。磁敏二极管的伏安特性为一条直线, 电流越大, 输出电压越大。
- (2) 在反向磁场 (如 $B=-0.2T$) 作用下, 磁敏二极管的电阻小, 电流大, 压降小。
- (3) 在正向磁场 (如 $B=0.2T$) 作用下, 磁敏二极管的电阻大, 电流小, 压降大。

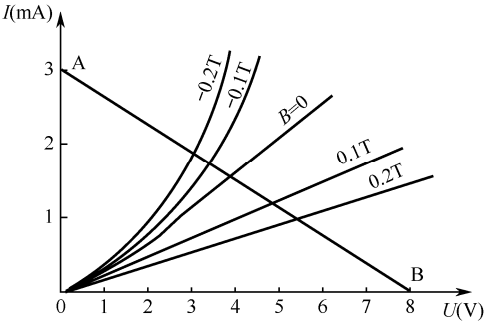
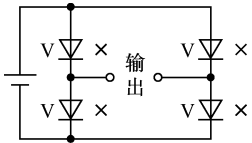
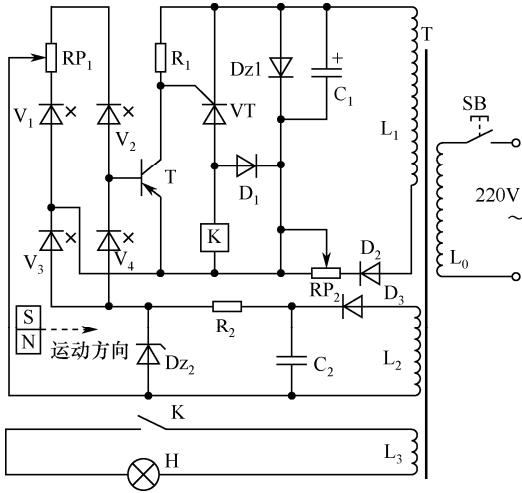
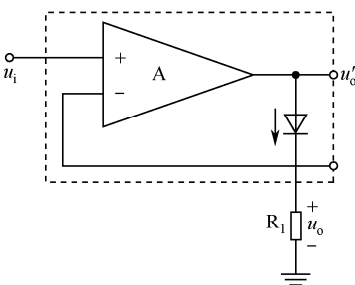
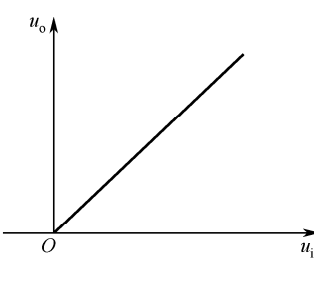


图 7-71 磁敏二极管的伏安特性曲线

8) 温度特性	磁敏二极管受温度影响较大，在使用中必须进行温度补偿。
9) 特点与产品系列	(1) 性能特点：磁敏二极管是利用元件电阻随磁场变化而变化的原理制成的。它是体积小、反应快、无触点、线性度好、磁灵敏度高的磁-电转换半导体器件，可以在较弱的磁场作用下产生随磁场方向改变而变化的较高输出的正负电压。
	(2) 常见产品系列：常见的磁敏二极管系列有 2ACM 系列和 2DCM 系列。
10) 应用 磁敏二极管广泛用于磁力探测、无损探伤、无触点开关、位移测量、转速测量等领域。 在选择磁敏二极管时要注意一些重要的参数，如额定工作电压 U 、工作电流 I_0 、工作频率 f_0 。	<div><div>(1) 温度补偿：当温度升高时，二极管的输出电压会发生变化。为减小温度的影响，可进行温度补偿，补偿办法就是将四只参数基本一致的磁敏二极管连接成磁敏电桥，如图 7-72 所示。</div><div></div><div>图 7-72 磁敏二极管组成的电桥电路</div></div>
	(2) 判断磁场方向：磁敏二极管在正向磁场或负向磁场的作用下，其输出电压信号增量的方向是不同的，依此可以判断磁场的方向。
	(3) 检测磁场强度：将磁敏二极管靠近通电导线时，导线的周围存在着磁场，磁场强，二极管输出的电压就高；磁场弱，输出的电压就低。这样就可以用磁敏二极管检测磁场强弱。
	(4) 测导线中的电流：将磁敏二极管放在导线周围磁场中的固定位置，导线中电流的大小就决定了二极管输出电压的高低。依此可做成无触点电流表，将磁敏二极管的输出电压换算出电流的大小，可代替电流互感器。
	(5) 无触点开关：在龙门刨或自动生产线上，把一个磁敏二极管或磁铁安装在运动物体上，另一个固定不动。当磁铁或磁敏二极管因运动彼此接近时，二极管就输出一个信号给开关电路，点亮指示灯或控制设备动作。
	<div></div> <div>图 7-73 磁敏二极管构成的无触点开关</div> <div>如图 7-73 所示，主电路由接触器 K、晶闸管 VT、保护电路等组成，检测电路主要由二极管 D_{z3}、稳压管 D_{z2}、磁敏电桥等构成，指示灯电源由变压器绕组 L_3</div>

10) 应用	提供。 D_2 、 D_3 各组成半波整流电路，为后续电路提供直流电源，SB 是按钮， C_1 、 C_2 为滤波电容器， DZ_1 、 DZ_2 为稳压管。
磁敏二极管广泛用于磁力探测、无损探伤、无触点开关、位移测量、转速测量等领域。	由四只磁敏二极管 $V_1 \sim V_4$ 构成的磁敏电桥，远离磁场时，电桥输出为零，三极管 T 和晶闸管 VT 都截止，接触器 K 的线圈中无电流流过，动合触点 K 保持断开状态，指示灯 H 不亮。
在选择磁敏二极管时要注意一些重要的参数，如额定工作电压 U 、工作电流 I_0 、工作频率 f_0 。	当磁敏电桥进入磁场后，其输出信号使三极管 T 导通，进而使晶闸管 VT 导通，接触器 K 的线圈中有电流流过，动合触点 K 闭合，指示灯 H 点亮。


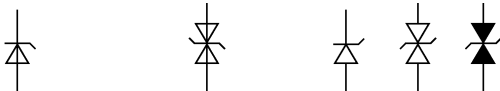
4. 精密二极管

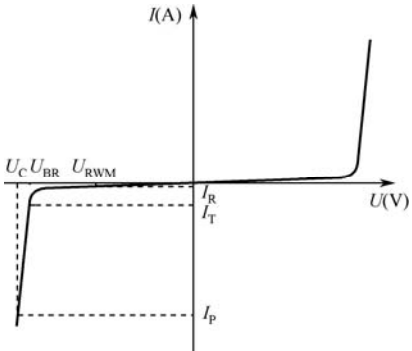
1) 符号	精密二极管（PD）是一种具有稳定电压功能与稳定电流功能的高精度二极管。其文字符号和图形符号与普通二极管相同。															
2) 内部电路 精密二极管（简称 PD）是由运算放大器和二极管一起组成的器件，是一种具有稳压和稳流功能的高精度二极管。 精密二极管的内部电路与传输特性如图 7-74 所示。	<div><div><p>(a) 电路</p></div><div><p>(b) 传输特性</p></div></div> <p>图 7-74 内部电路与传输特性</p>															
3) 特点	精密二极管的突出特点是工作温度范围宽、线性好、稳定性非常高，主要应用于各种电子电路中作为恒流源或恒压源。															
4) 类型 常用的精密二极管一般分为单管、对管和带温度补偿的二极管三类。	<p>(1) 单管型（简称 PD）：单管型精密二极管，其产品系列有 HW 等。</p> <p>(2) 对管型（简称 SPD）：是将两个相同的 PD 管芯封装在一个管壳内制成的，其产品有 SHW 系列等。</p> <p>(3) 温控型（简称 TPD）：是将 PD 管芯和加热电阻封装在一起制成的，通过控制加热电阻的电压和电流来实现温度的控制与调节，产品有 THW 系列等。</p>															
5) 参数（见表 7-17）	<div><p>表 7-17 四种精密二极管的主要参数</p><table><tr><th>型号</th><th>工作温度范围（℃）</th><th>动态电阻（Ω）</th></tr><tr><td>HW14</td><td>-50~+125</td><td>470</td></tr><tr><td>HW15</td><td>0~+125</td><td>900</td></tr><tr><td>HW16</td><td>-50~+125</td><td>450</td></tr><tr><td>HW17</td><td>0~350</td><td>470</td></tr></table></div>	型号	工作温度范围（℃）	动态电阻（Ω）	HW14	-50~+125	470	HW15	0~+125	900	HW16	-50~+125	450	HW17	0~350	470
型号	工作温度范围（℃）	动态电阻（Ω）														
HW14	-50~+125	470														
HW15	0~+125	900														
HW16	-50~+125	450														
HW17	0~350	470														

6) 用途	精密二极管在各种电子电路中主要用作恒流源或恒压源,也可用来把微弱的交流信号转换成单向脉动信号的精密整流或精密检波。	
7) 实用电路 由精密二极管组成的简单、实用的检波电路如图 7-75 所示。图中,电路主要由精密二极管(即检波二极管)、高速运算放大器和外围电路元件构成, U_i 为输入信号, U_o 为输出信号,电容的主要作用是滤波。	(1) 检波电路原理图(见图 7-75)	
	图 7-75 精密二极管构成的检波电路	
	(2) 运算放大器的浮空(即虚地)效应能自动补偿二极管结电压的影响,使其输出特性近似于理想二极管。	
	(3) 在检波过程中,精密二极管在一定程度上起到理想二极管的作用,大幅度提高了检波效率,在精密二极管通频带内的检波效率接近 100%。	
	(4)利用精密二极管可以方便地将交流信号的幅度逼真地转换为直流信号,便于进行精确测量,达到智能检测的目的。	
	(5)受运算放大器带宽增益积的限制,精密二极管的检波频率一般要小于运算放大器带宽的 1/500。	

5. 瞬变电压抑制二极管

瞬变电压抑制二极管(又称瞬态抑制二极管、瞬态电压抑制器,缩写为 TVS、TVP)是一种在遇到尖峰脉冲时,能以极高的速度从高阻态变为低阻态的二极管。

1) 常见瞬变二极管 (见图 7-76)		
	图 7-76 瞬变电压抑制二极管	
2) 符号	(1) 文字符号: 瞬变电压抑制二极管的文字符号是 DZ 或 TVS。	
	(2) 图形符号: 瞬变二极管的电路图形符号如图 7-77 所示。	
		
	(a) 单管国标符号 (b) 双管国标符号 (c) 其他图形符号	
	图 7-77 瞬变二极管图形符号	
3) 类型	(1) 单向 TVS 管 (又称单向击穿二极管)	其符号、特性与稳压二极管相似。
	(2) 双向 TVS 管 (又称双向击穿二极管)	其特性相当于两个稳压二极管反向串联。

4) 特点	瞬变电压抑制二极管具有响应速度快、能吸收瞬态大功率脉冲、漏电流小、钳位电压较易控制、体积小等特点，在受到高能量（如静电放电、交流电源的浪涌、开关电源的噪声等）冲击时，能迅速吸收极大电流并将电压钳位在预定数值。在单片机应用系统中，能防止单片机因瞬间脉冲所导致的失灵，消除由总线之间开关所引起的串扰和噪声干扰，是一种很好的突波吸收器。
5) TVS 二极管的分类	<div>(1) 按用途可分为通用型和专用型器件，如各种交流电压保护器、4~20mA 电流环保护器、数据线保护器、同轴电缆保护器、电话机保护器等。</div> <div>(2) 按封装及内部结构可分为轴向引线、双列直插 TVS 阵列（适用多线保护）、贴片式、组件式和大功率模块式等。</div> <div>(3) 按吸收的峰值脉冲功率可以分为 500W、1000W、1500W、5000W 四种规格。每种规格按其标称电压又分为三十多种。</div> <div>(4) 按 TVS 反向击穿电压与标准值的离散程度，可分为±5%VBR 和±10%VBR 两种。±5%器件的额定反向关断电压等于 85%的反向击穿电压；±10%器件的额定反向关断电压等于 81%的反向击穿电压。</div>
6) 特性曲线	<div>(1) 伏安特性曲线（见图 7-78）</div> <div></div> <div>图 7-78 双向 TVS 的伏安特性曲线</div> <div>(2) TVS 的正向特性与普通二极管相同；反向特性与典型的 PN 结雪崩器件相同。</div> <div>(3) TVS 被击穿后，两引脚间的电压被钳位在最大钳位电压。</div> <div>(4) 随着瞬态脉冲电流的衰减，TVS 两引脚间的电压也不断下降，最后恢复到起始状态。</div> <div>(5) 在瞬态峰值脉冲作用下，TVS 中的电流由原来的反向漏电流迅速上升到反向击穿电流。两引脚间的电压也由额定反向关断电压上升到击穿电压，TVS 被击穿。</div>
7) 检测 将万用表置于 R×1k 挡。	<div>(1) 对于单向型的 TVS，可测出其正反向电阻，正常 TVS 的正向电阻一般为 4kΩ 左右，反向电阻为无穷大，否则应丢弃或更换。</div> <div>(2) 对于双向型的 TVS，任意调换红、黑表笔测量其两引脚间的电阻值均应为无穷大，否则说明管子性能不良或已经损坏。</div>

6. 纳米硅开关二极管

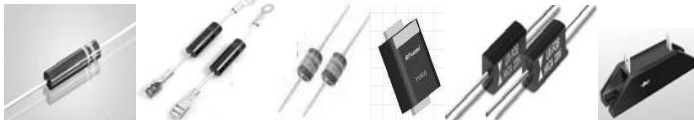
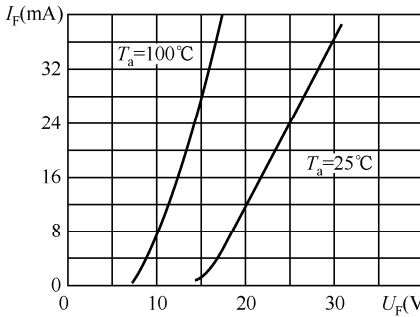
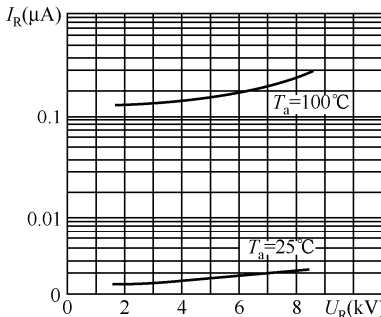
1) 分类	<div>(1) 纳米开关二极管。</div> <div>(2) 纳米光电二极管。</div> <div>(3) 纳米激光二极管。</div> <div>(4) 纳米隧道二极管。</div>
-------	---

2) 性能特点	(1) 耐高温	纳米硅开关二极管的工作温度可高达 250℃，而其他同类开关二极管一般为 125℃，适用于较高温度环境。
	(2) 开关速度快	纳米硅开关二极管的开关时间小于 1.0ns，比普通开关二极管短得多，适合应用于高速开关电路。
	(3) 漏电流小	纳米硅开关二极管的反向漏电流一般不大于 10nA，且能显著降低电路的噪声。
	(4)反向击穿电压	纳米硅开关二极管在室温下的反向击穿电压大于 60V，伏安特性相当稳定，具有良好的反向特性。
	(5) 结电容较大	在 PN 结结面积几乎相等的情况下，纳米硅开关二极管的结电容要比微波开关二极管大 10 倍以上。
3) 应用	广泛应用在超高速计算机、低噪声系统、航天、微波、光电、信息及油田、井下等环境中。	

7. 高效率二极管

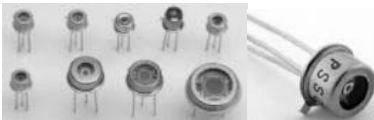
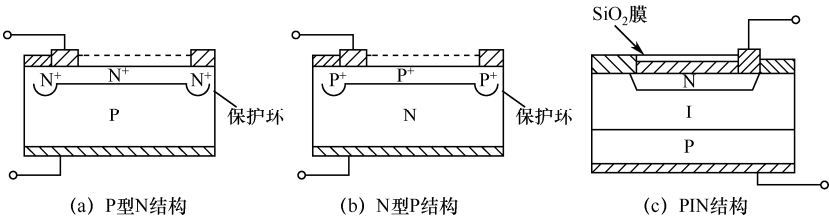
1) 常见高效率二极管	<p>高效率二极管（简称 HER）是一种具有开关特性好、反向恢复时间短等特点的半导体二极管，如图 7-79 所示。</p> <div></div> <p>图 7-79 高效率二极管</p>																																																												
2) 类型	<p>(1) 高效率整流二极管。</p> <p>(2) 高效率发光二极管。</p> <p>(3) 高效率肖特基二极管。</p>																																																												
3) 性能特点	<p>高效率二极管属于 PIN 结型二极管，即在 P 型硅材料与 N 型硅材料中间增加了基区 I，形成 PIN 结构。因基区很薄，反向恢复电荷很小，所以高效率二极管具有反向恢复时间较短、正向压降较低、反向漏电流小、反向击穿电压（耐压值）较高、较强的浪涌电压承受能力等特点。</p>																																																												
4) 技术参数 部分高效率整流二极管的技术参数见表 7-18。	<table><tr><th colspan="6">表 7-18 高效率整流二极管主要参数表</th></tr><tr><th>型号 JOD</th><th>正向电流 I_F (A)</th><th>正向电压 U_F (V)</th><th>反向电压 U_R (V)</th><th>反向漏电流 I_R (μA)</th><th>反向恢复时间 T_{rr} (ns)</th></tr><tr><td>HER201</td><td>2.0</td><td>1.0</td><td>50</td><td>5.0</td><td>50</td></tr><tr><td>HER202</td><td>2.0</td><td>1.0</td><td>100</td><td>5.0</td><td>50</td></tr><tr><td>HER203</td><td>2.0</td><td>1.0</td><td>200</td><td>5.0</td><td>50</td></tr><tr><td>HER204</td><td>2.0</td><td>1.3</td><td>300</td><td>5.0</td><td>50</td></tr><tr><td>HER205</td><td>2.0</td><td>1.3</td><td>400</td><td>5.0</td><td>50</td></tr><tr><td>HER206</td><td>2.0</td><td>1.3</td><td>600</td><td>5.0</td><td>70</td></tr><tr><td>HER207</td><td>2.0</td><td>1.7</td><td>800</td><td>5.0</td><td>70</td></tr><tr><td>HER208</td><td>2.0</td><td>1.7</td><td>1000</td><td>5.0</td><td>70</td></tr></table>	表 7-18 高效率整流二极管主要参数表						型号 JOD	正向电流 I_F (A)	正向电压 U_F (V)	反向电压 U_R (V)	反向漏电流 I_R (μA)	反向恢复时间 T_{rr} (ns)	HER201	2.0	1.0	50	5.0	50	HER202	2.0	1.0	100	5.0	50	HER203	2.0	1.0	200	5.0	50	HER204	2.0	1.3	300	5.0	50	HER205	2.0	1.3	400	5.0	50	HER206	2.0	1.3	600	5.0	70	HER207	2.0	1.7	800	5.0	70	HER208	2.0	1.7	1000	5.0	70
表 7-18 高效率整流二极管主要参数表																																																													
型号 JOD	正向电流 I_F (A)	正向电压 U_F (V)	反向电压 U_R (V)	反向漏电流 I_R (μA)	反向恢复时间 T_{rr} (ns)																																																								
HER201	2.0	1.0	50	5.0	50																																																								
HER202	2.0	1.0	100	5.0	50																																																								
HER203	2.0	1.0	200	5.0	50																																																								
HER204	2.0	1.3	300	5.0	50																																																								
HER205	2.0	1.3	400	5.0	50																																																								
HER206	2.0	1.3	600	5.0	70																																																								
HER207	2.0	1.7	800	5.0	70																																																								
HER208	2.0	1.7	1000	5.0	70																																																								
5) 应用	<p>高效率整流二极管主要应用在开关电源、PWM 脉宽调制器、变频器等电力电子电路中作为高频整流二极管、续流二极管或阻尼二极管。</p>																																																												

8. 高压二极管

1) 常见高压二极管 (见图 7-80)	<div></div> <div>图 7-80 高压二极管</div>																																																																																																		
2) 类型	高压二极管有高压整流二极管、微波炉专用高压二极管、低频高压二极管、高频高压二极管、超高频高压二极管、双向高压二极管、高压硅堆和高压双向触发二极管等多种类型。																																																																																																		
3) 性能特点	高压二极管是采用高可靠性的多层台面结构及硅型管芯、环氧树脂模压成密闭的小体积封装的二极管。它容量大、恢复时间短、正向导通压降低、漏电流小, 具有雪崩电压击穿保护、抗高压浪涌电流冲击、抗腐蚀、耐高温等优良性能。																																																																																																		
4) 典型伏安特性曲线	<div><div><div></div><div>正向特性曲线</div></div><div><div></div><div>反向特性曲线</div></div></div> <div>图 7-81 伏安特性曲线</div>																																																																																																		
5) 技术参数 常见高压二极管的主要参数见表 7-19。	<div>表 7-19 常见高压二极管主要参数</div> <table><tr><th>型号</th><th>反向峰值电压 (V)</th><th>正向平均电流 (μA)</th><th>正向峰值电压 (V)</th><th>反向直流电流 (μA)</th><th>正向浪涌电流 (μA)</th><th>恢复时间 (ns)</th></tr><tr><td>2CL70</td><td>6.0</td><td>5.0</td><td>20</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL71</td><td>8.0</td><td>5.0</td><td>25</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL72</td><td>10.0</td><td>5.0</td><td>30</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL73</td><td>12.0</td><td>5.0</td><td>35</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL74</td><td>14.0</td><td>5.0</td><td>40</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL75</td><td>16.0</td><td>5.0</td><td>43</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL76</td><td>18.0</td><td>5.0</td><td>45</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL77</td><td>20.0</td><td>5.0</td><td>45</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL79</td><td>25.0</td><td>5.0</td><td>50</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>2CL82</td><td>30.0</td><td>5.0</td><td>55</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>JB04</td><td>4.0</td><td>5.0</td><td>18</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>JB08</td><td>8.0</td><td>5.0</td><td>25</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>100</td></tr><tr><td>ESJA58-06A</td><td>6.0</td><td>5.0</td><td>25</td><td>2.0</td><td>0.5</td><td>80</td></tr></table>	型号	反向峰值电压 (V)	正向平均电流 (μA)	正向峰值电压 (V)	反向直流电流 (μA)	正向浪涌电流 (μA)	恢复时间 (ns)	2CL70	6.0	5.0	20	2.0	0.5	100	2CL71	8.0	5.0	25	2.0	0.5	100	2CL72	10.0	5.0	30	2.0	0.5	100	2CL73	12.0	5.0	35	2.0	0.5	100	2CL74	14.0	5.0	40	2.0	0.5	100	2CL75	16.0	5.0	43	2.0	0.5	100	2CL76	18.0	5.0	45	2.0	0.5	100	2CL77	20.0	5.0	45	2.0	0.5	100	2CL79	25.0	5.0	50	2.0	0.5	100	2CL82	30.0	5.0	55	2.0	0.5	100	JB04	4.0	5.0	18	2.0	0.5	100	JB08	8.0	5.0	25	2.0	0.5	100	ESJA58-06A	6.0	5.0	25	2.0	0.5	80
型号	反向峰值电压 (V)	正向平均电流 (μA)	正向峰值电压 (V)	反向直流电流 (μA)	正向浪涌电流 (μA)	恢复时间 (ns)																																																																																													
2CL70	6.0	5.0	20	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL71	8.0	5.0	25	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL72	10.0	5.0	30	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL73	12.0	5.0	35	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL74	14.0	5.0	40	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL75	16.0	5.0	43	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL76	18.0	5.0	45	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL77	20.0	5.0	45	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL79	25.0	5.0	50	2.0	0.5	100																																																																																													
2CL82	30.0	5.0	55	2.0	0.5	100																																																																																													
JB04	4.0	5.0	18	2.0	0.5	100																																																																																													
JB08	8.0	5.0	25	2.0	0.5	100																																																																																													
ESJA58-06A	6.0	5.0	25	2.0	0.5	80																																																																																													

5)技术参数 常见高压二 极管的主要参 数见表 7-19。	(续表)						
	型号	反向峰值 电压 (V)	正向平均 电流 (μA)	正向峰值 电压 (V)	反向直流 电流 (μA)	正向浪涌 电流 (μA)	恢复时间 (ns)
	ESJA58-08A	8.0	5.0	30	2.0	0.5	80
	ESJA08-08	8.0	5.0	28	2.0	0.5	80
	ESJA52-10A	10.0	5.0	30	2.0	0.5	80
	ESJA52-12A	12.0	5.0	35	2.0	0.5	80
	ESJA52-14A	14.0	5.0	40	2.0	0.5	80
	ESJA53-16A	16.0	5.0	55	2.0	0.5	80
	ESJA53-18A	18.0	5.0	60	2.0	0.5	80
	ESJA53-20A	20.0	5.0	65	2.0	0.5	80
6) 应用	高压二极管广泛应用于静电除尘、医用 X 射线机、CT、源油脱水、广播电视发射、激光电源、高压发生器、电视机/显示器、微波炉、空气净化器、负离子发生器、激光电源、霓虹灯电源、电压倍增电路等。						

9. 雪崩二极管

1) 常见雪崩二极管 (见图 7-82)	
	图 7-82 雪崩二极管
2)主要材料	雪崩二极管是利用半导体结构中载流子的碰撞电离和渡越时间两种物理效应而产生负阻特性的固体微波器件，是在外加电压作用下可以产生高频振荡的晶体管。
3)雪崩二极管的分类	(1) 单漂移区雪崩二极管的结构有 PN、PIN、PNN (或 NPP)、PNIN (或 NPIN)、MNN 等多种。其中 PNN 结构工艺简单，在适中的电流密度下能获得较大的负阻，且频带较宽，因此在工业中应用较多。
雪崩二极管分单漂移区雪崩二极管和双漂移区雪崩二极管。	(2) 双漂移区雪崩二极管的结构为 PPNN，实质上相当于两个互补单漂移区雪崩二极管的串联，有效地利用了电子和空穴漂移空间，获得了较高的输出功率和效率。
4) 雪崩二极管的结构	
常见雪崩二极管的典型结构示意图如图 7-83 所示。	(a) P型N结构 (b) N型P结构 (c) PIN结构
	图 7-83 雪崩二极管常见结构示意图

5) 工作模式 雪崩二极管的工作模式有多种, 主要有碰撞雪崩渡越时间 (IMPATT) 模式, 简称崩越模式; 另一种重要的工作模式是俘获等离子体雪崩触发渡越时间 (TRAPATT) 模式, 简称俘越模式。	(1) 崩越模式 其工作原理是利用半导体 PN 结中载流子的碰撞电离和渡越时间效应产生微波频率下的负阻特性, 进而产生振荡。
	(2) 俘越模式 其工作过程是在电路中产生电压过激以触发器件, 使势垒区充满电子、空穴等离子, 造成器件内部电场突然降低, 导致离子逐渐漂移出势垒区。在这种模式下的工作频率较低, 但输出功率和效率都大得多。
	(3) 其他模式 此外还有谐波模式、参量模式、静态模式及热模式等。
6) PIN 型雪崩光电二极管	<p>(1) 雪崩光电二极管是工作于接近 (但没有达到) 雪崩击穿状态的、高度均匀的半导体光电二极管。</p> <p>(2) 当半导体二极管加上足够高的反向偏压时, 在耗尽层内运动的载流子就可能因碰撞电离效应而获得雪崩倍增。由于载流子的雪崩增益非常高, 致使二极管进入雪崩击穿状态, 从而使半导体光电二极管具有内部的光电流增益。由于 PIN 型光电二极管在较高的反向偏置电压的作用下耗尽区扩展到整个 PN 结结区, 形成自身保护 (具有很强的抗击穿功能), 因此 PIN 型雪崩光电二极管不必设置保护环。</p> <p>(3) 雪崩二极管是在外加电压作用下可以产生高频振荡的晶体管。产生高频振荡的工作原理是利用雪崩击穿对晶体注入载流子, 因载流子渡越晶片需要一定的时间, 所以其电流滞后于电压, 出现延迟时间, 适当控制渡越时间, 可获得在电流和电压关系上出现的负阻效应, 进而产生高频振荡。</p>
7) 技术参数	(1) 额定击穿电压: 额定击穿电压是指反向电流小于 1mA 时的击穿电压。
	(2) 最大钳位电压: 最大钳位电压是指二极管在通过规定波形的几十至几百安的电
	流时两端出现的最高电压。
	(3) 脉冲功率: 脉冲功率是指在规定的 1/100μs 电流波形下, 二极管两端的最大钳位电压与管中电流峰值的乘积。
	(4) 反向变位电压: 在二极管不被击穿情况下, 其两端所能施加的最高反向电压。
	(5) 最大泄漏电流: 在反向变位电压作用下, 二极管中流过的最大反向电流。
8) 特点及应用	雪崩二极管的主要优点是功率大、效率高等, 主要缺点是噪声较大。它是固体微波源, 特别是毫米波发射源的主要功率器件。广泛用于雷达、通信、遥控、遥测、仪器仪表中。

(1) 脉冲波雪崩二极管主要电参数（见表 7-20）

表 7-20 常见脉冲雪崩二极管主要电参数

参数名称	工作频率	输出功率	工作电压	工作电流	正向微分电阻	反向电流	总电容	热阻	击穿电压	效率
单位	GHz	mW	V	A	Ω	μA	pF	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	V	—
极限值 型号	最大	最小	最大	最大	最大	最大	最大	最大	最大	—
WX341	16.0~17.0	200	83~103	0.07~0.2	1.0	1.0	—	20	—	—
WX342	16.0~17.0	350	83~103	0.07~0.2	1.0	1.0	—	20	—	—
WX361	30~40	5	36~65	4~10	1.5	$I_{@15\text{V}}$	6.5~16	—	—	—
WX362	30~40	8	36~65	4~10	1.5	$I_{@15\text{V}}$	6.5~16	—	—	—
WX3651	75~110	5	26 (typ)	11 (typ)	2.0	—	4.5 (typ)	35	14~20	5 (typ)
WX3652	75~110	12	26 (typ)	11 (typ)	2.0	—	4.5 (typ)	35	14~20	5 (typ)
WX401	32~40	12	55 (typ)	10 (typ)	1.0	—	10 (typ)	—	35~50	5 (typ)
WX402	32~40	20	55 (typ)	10 (typ)	1.0	—	10 (typ)	—	35~50	5 (typ)
WX431	30~40	10	40 (typ)	5 (typ)	1.0	—	10 (typ)	—	30~39	5 (typ)
WX432	34~37	15	40 (typ)	5 (typ)	1.0	—	10 (typ)	—	30~39	5 (typ)

(2) 连续波雪崩二极管主要电参数（见表 7-21）

表 7-21 常见连续波雪崩二极管主要电参数

参数名称	工作频率	输出功率	工作电压	工作电流	正向微分电阻	反向电流	总电容	热阻	效率
符号	f	P_o	U_o	I_o	r_F	I_R	C_{tot}	R_{th}	$\eta (\%)$
单位	GHz	mW	V	mA	Ω	μA	pF	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$	
极限值 型号	最大	最小	最大	最大	最大	最大	最大	最大	—
WX35	12~15	400	90~115	80~100	0.75	0.1	3.5~5.5	16	—
WX371	28~40	300	35~55	120~240	2.0	1.0	1.5~3.5	25	—
WX372	28~40	400	33~55	120~240	2.0	1.0	1.5~3.5	25	—
WX381	8~10	400	95 (typ)	115	0.8	—	5~10	18 (typ)	5 (typ)
WX382	8~10	500	95 (typ)	115	0.8	—	5~10	18 (typ)	5 (typ)
WX391	28~40	350	35~50	90~140	—	—	—	—	—
WX392	30~40	500	35~50	90~140	—	—	—	—	—

9) 常见雪崩二极管参数

10. 微波二极管

1) 固体微波器件	<p>微波二极管中有混频二极管、检波二极管、变容二极管、阶跃二极管、PIN 二极管、限幅二极管、变容二极管、固体噪声二极管、雪崩二极管、肖特基二极管、隧道二极管、耿氏二极管等。</p> <p>微波波段通常指频率从 300MHz 到 300GHz。</p>
2) 制造材料	<p>微波二极管的基片材料是锗、硅、砷化镓等。</p>
3) 特点与应用	<p>微波二极管的最高工作频率可高至 300GHz；具有体积小、可靠性高等优点。多用于微波振荡、放大、变频、微波开关、移相和调制等领域。</p>
4) 常用微波二极管	<p>(1) 混频二极管</p> <p>多是肖特基二极管，是基于金属-半导体相接触具有非线性电导的原理制成的两端器件。这种二极管一般采用点接触结构，具有单向导电性，且噪声小。整个微波频带内直接用混频二极管的微波接收机的噪声系数一般为 4.0~70dB。</p>
	<p>(2) 检波二极管</p> <p>它（一般为肖特基二极管）的工作频率从几百兆赫到 300GHz，覆盖整个微波波段，且具有噪声低、频带宽、抗高温性能好等特点。检波二极管的工作频率范围多为 0~40GHz。</p>
	<p>(3) 变容二极管</p> <p>它是基于 PN 结结电容大小随反向偏压变化的原理制成的微波半导体器件，主要分为低噪声参量放大器用变容管和电调谐用变容管两大类。前者主要用于微波参量放大器；后者主要用于频率调谐、压控振荡器、电子对抗和变频雷达快速调频等。此外，变容管还可以用于微波移相、限幅等。参量放大器用变容二极管具有良好的电容非线性和很高的优值；电调谐用变容二极管具有很大的电容变化区，并且也具有较高的优值。</p>
	<p>(4) 阶跃二极管</p> <p>它是一种窄 I 层结构的 PIN 二极管。当工作状态从正向转到反向时，其反向恢复时间很短，且含有极丰富的谐波和反向非线性电容效应。主要用于高频稳定倍频器，同石英晶体振荡器一起可使微波源的频率稳定度达到 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ 量级。</p>
	<p>(5) 限幅二极管</p> <p>它是利用二极管正向导通时的低通态电阻来限制微波信号的幅度。功率较小时，可选用优质变容二极管；射频功率较大时，可采用 PIN 二极管。</p>
	<p>(6) 固体噪声二极管</p> <p>它（即固体噪声源）是基于 PN 结反向雪崩击穿时产生无规则噪声而制成的微波器件。</p> <p>雪崩固体噪声二极管具有噪声频谱宽、稳定性好、寿命长、工作电压低（20~30V）等优点。工作频率范围为 0~40GHz。</p>

4)常用微波二极管	<p>(7) 雪崩渡越二极管</p> <p>它(又称里德二极管)是基于 PN 结反向雪崩倍增和渡越产生射频负阻原理制成的一种微波功率器件。这类二极管有里德结构(即 P+NIN+)、肖特基结构、高-低-高结构、双漂移结构等多种。所用材料主要有硅和砷化镓。</p> <p>雪崩渡越二极管又分为 PN 结雪崩渡越二极管、俘获等离子体雪崩触发渡越时间二极管、金属-半导体-金属势垒渡越二极管、隧道雪崩渡越二极管等类型。</p> <p>雪崩渡越二极管的工作频率为几百兆赫至 300GHz,目前在毫米波波段是功率最大的固体器件。既可连续波工作,也可脉冲工作。缺点是噪声稍大。</p> <p>微波二极管具有工作频率高、体积小和可靠性高等优点,广泛用于微波振荡、噪声放大、变频、开关、移相、功率产生、变频、调制、解调、信号控制等电路。</p>
	<p>(8) 体效应二极管</p> <p>它(又称转移电子器件、耿氏器件,简称体二极管)是利用 N 型砷化镓(GaAs)外延材料在电场作用下、电子从高迁移率的低能谷跃迁到低迁移率的高能谷导致负微分迁移率的转移电子效应的原理制成的微波半导体器件。</p> <p>当体效应管的外加电压超过某一门槛时,它的电流随着电压增加反而减小,出现了负阻效应。器件的放大和振荡作用就是利用其负阻效应产生的。由于这种负阻效应发生在某些 N 型半导体的整个晶片体内,所以称为体效应管。</p> <p>体效应管的工作频率通常为 4~100THz,输出功率可从几十毫瓦到数百毫瓦。</p> <p>体效应二极管具有工作频率高、稳定性强、可靠性高、噪声小、频带宽、工作电压低、寿命长等优点;缺点是转换效率偏低,大部分输入功率都转化为热而被消耗,不利于器件长期可靠工作。</p> <p>体效应管通常作为雷达和通信机的本振源或中、小功率发射源器件,用于多普勒移动测速、入侵报警、警用雷达、精密制导、车辆防碰撞、微波遥感以及医疗设备等。</p>

附录 A 晶体管的封装形式

晶体管的封装形式是指管的外形及外壳，在大功率、高反压、高频、高速、射频微波、低噪声、高灵敏度等很多应用场合起着举足轻重与不可替代的作用。国产晶体管按原部标规定有近 30 种外形和几十种规格，但现在采用国际通行封装形式的多起来了。通常情况下，外形结构和规格分别用字母和数字表示。相同封装形式的内部电路可能不同，也可能有多个名称，因为封装原本没有统一的国际标准，通常是各自设计、约定俗成且新品不断。

一、概述

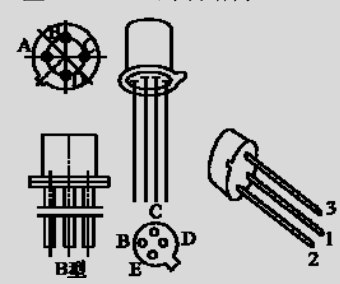
封装材料	主要有金属、塑料、陶瓷、树脂及玻璃。
封装结构表示	通常是字母加数字，如 TO-220、SOT-23 等。同一种结构可有几种表示方式。封装形式相同的，内部电路可以不同。
装配方式	有插装（通孔式）、贴装（表面安装）和直接安装。
引脚形状	有长引线直插、短引线或无引线（贴装）等。
封装技术	(1) 微小尺寸封装。 (2) 金属膜 MELF 无引线圆柱形封装，多用于二极管。 (3) 复合化封装，多用于对管、管阵列等。有共集、共射、达林顿等方式。 (4) 球阵列封装，体积小、热阻小、通态电阻低、有强的表面保护能力。 (5) 无引线封装。 (6) 直接 FET 封装，主要用于低电压大电流功率 MOSFET，可双面散热。 (7) 无铅化封装，又称全绿色封装，可满足环保要求。

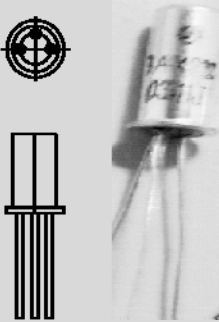
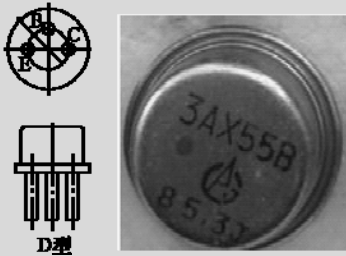
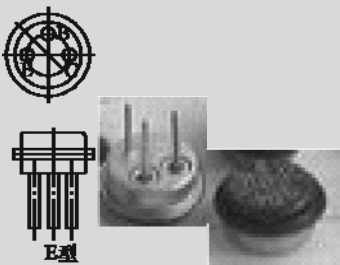
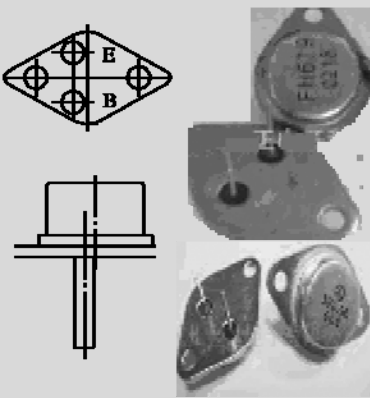
二、国产晶体管（部标）封装形式

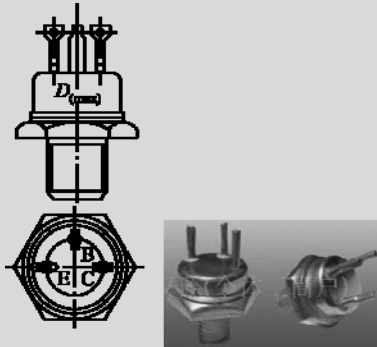
国产晶体管按部标规定有数十种外形及规格，分别使用不同的材料并用字母和数字表示。现在的国产晶体管也多采用国际通用封装形式。

1. 金属封装及外形

采用金属外壳封装的晶体管主要分为 B~G 六种外形结构，各种外形结构又分为多种规格。此外，还有非部标封装的外形，主要用于大功率晶体管。

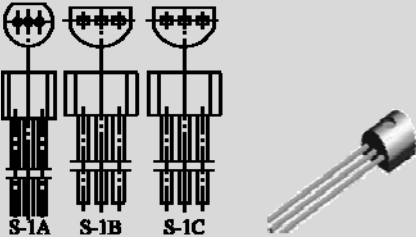
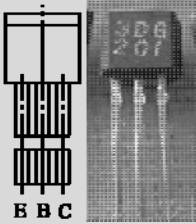
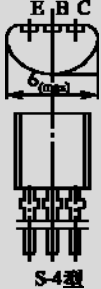
<p>1) B 型（TO-18）封装结构</p>  <p>1—基极；2—集电极；3—发射极</p>	<p>(1) 采用该种封装的三极管为：B-1 的有 3DK21、3DK28、3DK101~3DK103、3CG18、3CK110、3CK112、3DJ1、3DJ2、3DJ6 等；B-2 的有 3CK35、3CK37、3DA96、3DA72 等；B-3 的有 3CG190、3CG200、3CG18、3DK104~3DK107 等；B-4 的有 3DK14、3DK9、3CK121、3CD130、3CG21、3CG2 等。</p> <p>(2) 引脚识别：引脚向上，从外壳凸起部位（称定位销或管键）起，顺时针方向依次为 E、B、C、D 脚，其</p>
--	--


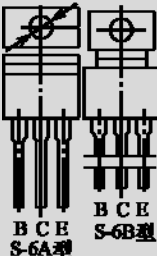
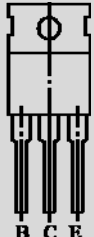
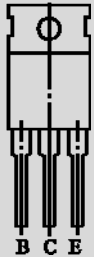
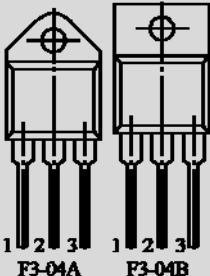
<p>B 型封装结构分为 B-1~B-6 共 6 种规格，主要用于 1W 及以下的高频小功率晶体管，其中 B-1、B-3 型最为常用。</p>	<p>中靠近凸起的引脚为 E，D 脚与外壳相连（接地）。此种封装的三极管通常为三个引脚，有的是四个引脚（多为高频三极管）。</p>
<p>2) C 型封装结构</p> <div data-bbox="198 333 415 656"></div>	<p>(1) 主要用于锗材料的低频小功率晶体管和硅材料的开关管。</p> <p>(2) 引脚识别与 B 型相同。</p> <p>(3) 采用此封装的晶体管型号有 3AX31、3AX81、3AG1 等。</p>
<p>3) D 型封装结构</p> <div data-bbox="120 723 463 980"></div>	<p>(1) D 型封装结构分为 D-1 型和 D-2 型。其外形与 B 型相同。它没有定位销，三个引脚呈等腰三角形分布。</p> <p>(2) 采用 D 型封装的三极管型号有 3AX55、3AX61、3AD11、3AD18、3AD19 等。</p> <p>(3) 引脚识别：管底面对自己，等腰三角形的底面朝下，按顺时针方向依次为 E、B、C。</p>
<p>4) E 型封装结构</p> <div data-bbox="126 1047 463 1313"></div>	<p>(1) 引脚识别与 D 型相同。</p> <p>(2) 采用 E 型封装结构的晶体管有 3DA86、3DK10 等型号。</p>
<p>5) F 型封装结构</p> <div data-bbox="108 1380 475 1780"></div>	<p>(1) F 型分为 F-0~F-4 型五种规格，各规格外形相同而尺寸不同，其中 F-2 型封装结构应用最多。</p> <p>(2) 引脚识别：在管底面对自己、小等腰三角形的底面朝下时，引脚识别左为 E，右为 B，两固定孔为 C。</p> <p>(3) 型号：采用 F 型封装的三极管主要是各种低频大功率晶体管。F-1 的有 FH004（达林顿管）等；F-2 的有 3DD15、3DD102、3DD200、3DD207、3DD303、3DD502 等；F-3 的有 3DA2238、3DA3175、3DA4301 等；F-4 的有 FH150、FH200（复合管）等。</p>

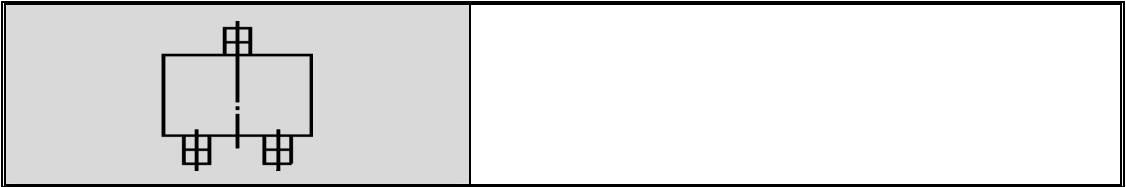
<p>6) G 型封装结构</p> 	<p>(1) 规格：G 型分为 G-1~G-6 六种规格，其中 G-1、G-2 的引脚线为圆形，G-3~G-6 引脚线为扁形。G 型封装结构晶体管的管座多为六边形，管体上带有固定螺杆。</p> <p>(2) 引脚识别：当管底面对自己、等腰三角形的底面朝下时，按顺时针方向，引脚依次为 E、B、C。</p> <p>(3) 应用：主要用于低频大功率晶体管。使用最多的是 G-3、G-4 型。</p>
---	---

2. 塑料封装及外形

采用塑料封装的晶体管分为 S-1 型、S-2 型、S-4~S-8 型、F3 型和 E3-01A 型等。


<p>1) S-1 型封装</p> 	<p>(1) 规格：此封装有 S-1A~S-1C 等规格。主要用于封装小功率三极管。</p> <p>(2) 引脚识别：在平面朝外，半圆形朝内、引脚朝上时的引脚识别从左到右为 E、B、C。</p> <p>(3) 型号：采用此封装的型号有 3DG9011、3DG8050、3DG8、3DG201、3DG9014、3CG9012、3CG201、3CG8550、3CX201 等。</p>
<p>2) S-2 型封装</p> 	<p>(1) 引脚识别：将三极管的引脚朝下，把有切角的一面（印有型号的面）对着自己，从左向右依次为 E、B、C。</p> <p>(2)型号：采用此封装的晶体管有 3DG57、3DG6、3DG201 等型号。</p>
<p>3) S-4 型封装</p> 	<p>此封装有 S-4A 和 S-4B 两种规格。</p>
<p>4) S-5 型封装</p>	<p>(1) 引脚识别：让管子的引脚朝下，将印有型号的平面对着自己，从左至右依次为 B、C、E。如将平面朝外、半圆形朝内、引脚朝上时，引脚从左到右依次为 E、B、C。</p>

	<p>(2) 型号：采用此种封装的三极管主要是中、低频大功率晶体管，型号有 DK53、3DA863、3DD2481 等。</p>
<p>5) S-6 型封装</p> 	<p>(1) 规格：此封装有 S-6A~S-6E 等规格。主要用于大功率三极管。</p> <p>(2) 引脚识别：切角面面对自己，引脚朝下，从左到右依次是 B、C、E。</p>
<p>6) S-7 型封装</p> 	<p>(1) 规格及特征：此封装形式的三极管自带散热片，有 S-7A~S-7C 等规格，其中 S-7A、S-7B 的外形尺寸基本相同，只是 S-7B 型封装的散热片两侧无豁口。</p> <p>(2) 引脚识别：将管子的引脚朝下，把标有型号的一面对着自己，从左至右依次为 B、C、E。</p> <p>(3)此封装主要用于低频大功率三极管，型号有 DSIOA-E、DS-30 A-E、DS31、DS33、YZ21SA-E（达林顿管）等。</p>
<p>7) S-8 型封装</p> 	<p>(1) 规格：S-8 封装有 S-8A~S-8C 等规格。其中，S-8A 型封装的散热片两侧带豁口，而 S-8B 和 S-8C 型封装的散热片为平齐状。</p> <p>(2) 采用此封装的三极管有（达林顿管）YZ33SA-C、YZ23SA-F 等。</p> <p>(3) 引脚识别：将管子标有型号的一面对着自己，把引脚朝下，从左至右依次为 B、C、E。</p>
<p>8) F3 型封装</p> 	<p>(1) 此封装有 F3-04A、F3-04B 等规格。</p> <p>(2) 型号：主要用于各种高反压三极管，型号有（达林顿管）YZ33SA-C、YZ23SA-F 等。</p>
<p>9) E3-01A 型封装</p>	<p>主要用于片状晶体管（表面贴装器件）。</p>

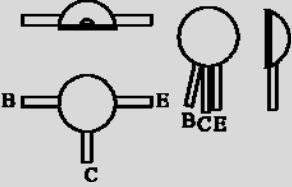


3. 玻璃封装



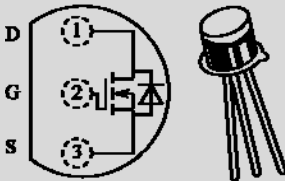
封装外形为 B-1 型，现已很少采用。



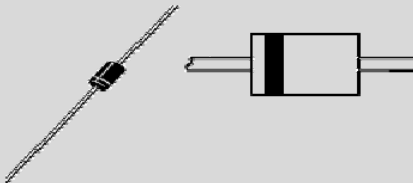
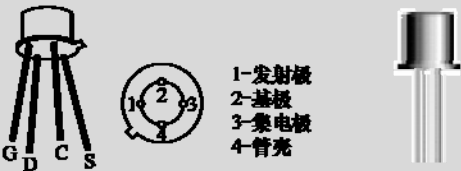

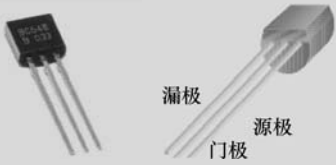
<p>B-1 型玻璃封装晶体管</p> 	<p>(1) 引脚识别：管壳上标有色点，靠近色点的引脚是集电极（或此引脚较其他引脚短些），中间引脚是基极，另一个是发射极。</p> <p>(2) 型号：采用玻璃封装的晶体管型号有 3AX72、3AX34A~3AX34K、3AX81 等。</p>
---	--

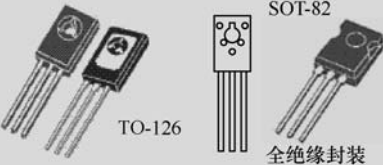

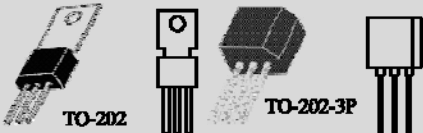

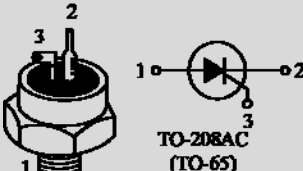

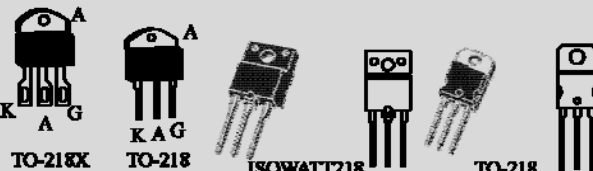
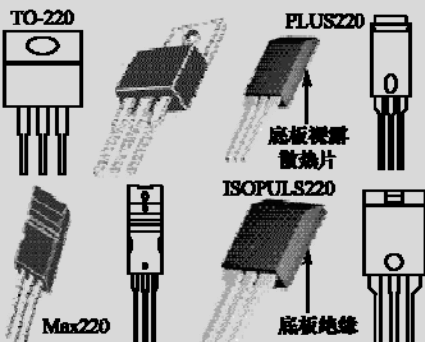
4. 陶瓷与环氧树脂封装

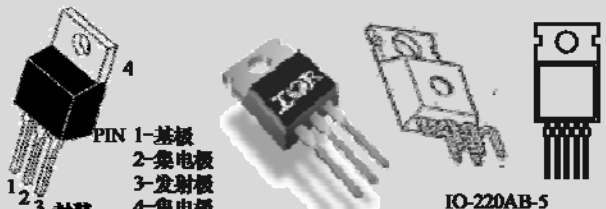
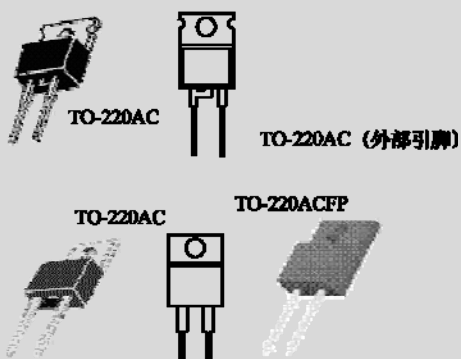

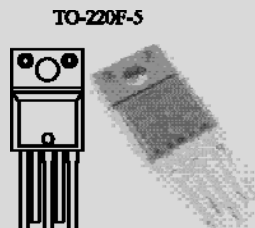
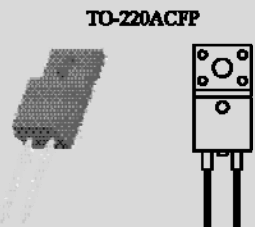
<p>B-2 型陶瓷与环氧树脂封装晶体管</p> 	<p>(1) 采用环氧树脂封装的超小型晶体管型号有 3DG1C、3DG13A~3DG13D、3DG14 和 CF104~CF106 等。</p> <p>(2) 采用陶瓷封装的晶体管多为微型晶体管，主要型号有 3CG1A、3CG1B、3CG1C 等。</p> <p>(3) 引脚识别：当球面朝上，使轴向两引脚与两眼连线平行时，引脚从左边起按逆时针方向依次是基极、集电极和发射极。</p>
---	--

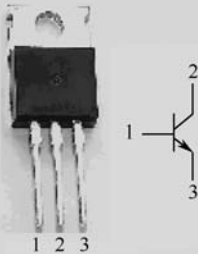


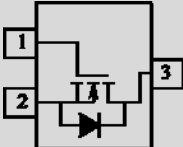
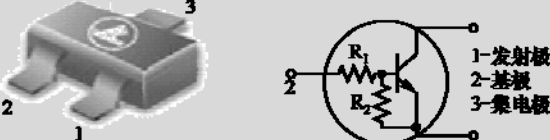
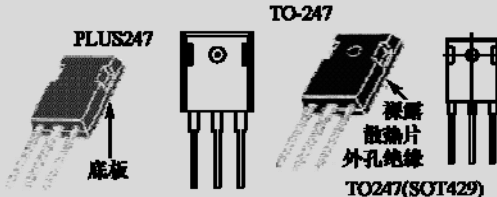
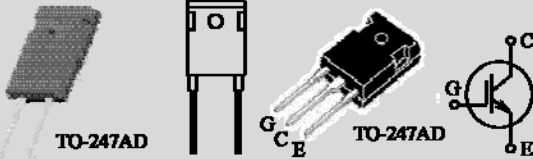
三、通用晶体管常见封装形式

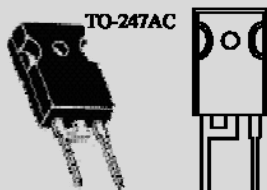
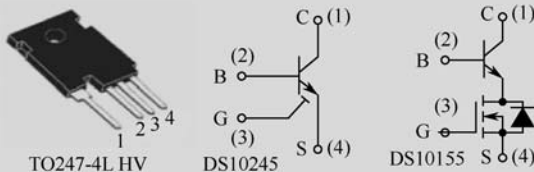


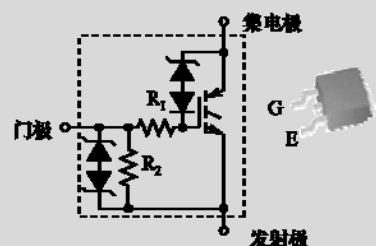
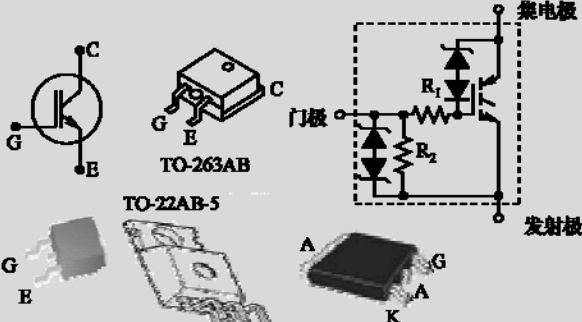
<p>1) LL-34 型封装</p> 	<p>采用此封装形式的有 TCLL4148、TCLL4151B、TCLLZxx、TCBAV103、TCZMxxxB 等。</p>
<p>2) TO-15X 型封装</p> 	<p>采用此封装形式的有 K1400G、K2200G、K3000G 等。</p>
<p>3) TO-18 (TO-92-18RM) 型封装</p> 	<p>采用此封装形式的有 2N4391、BS170、2N2222A、2N2221A 等。</p>

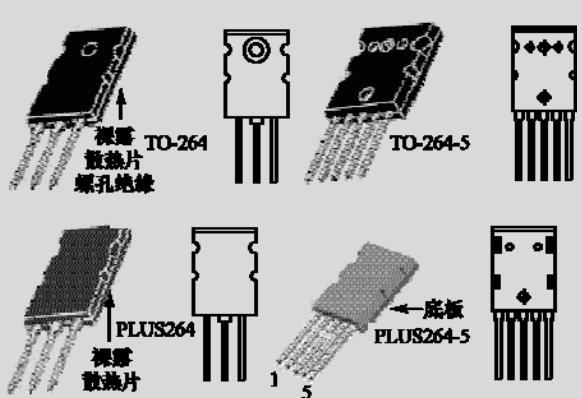
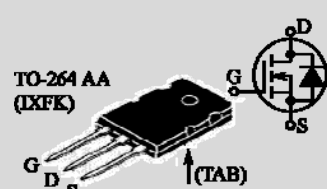

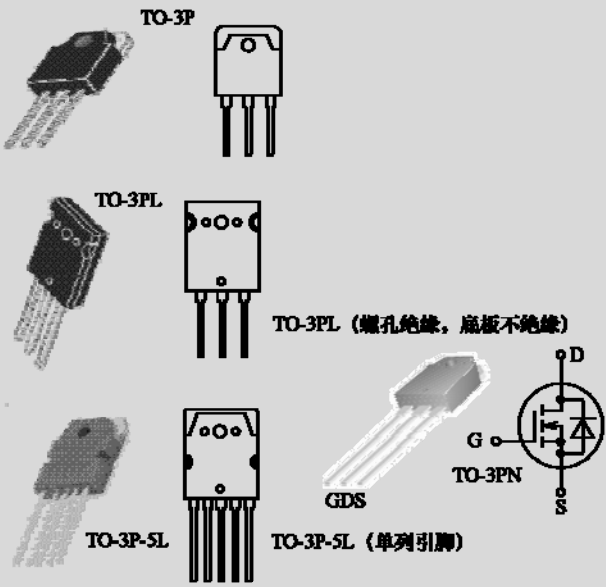
4) TO-35 型封装		采用此封装的器件有 DB3、DB4、DC34、SMDB3、1N4148 等。
5) TO-39 型封装	 <div>1-发射极 2-基极 3-集电极</div>	采用此封装形式的晶体管有 BT-33、BT-33F、MRF544 等。
6) TO-41 型封装		采用此封装的器件有 KP1V160RL、MKP1V240、MKP1V240R、MKP1V240、MKP1V240RLIN5819、1N5817、1N4001~1N4007、1N4728A、N4761A 等。
7) TO-72 型封装	 <div>1-发射极 2-基极 3-集电极 4-管壳</div>	采用此封装的器件有 2N4416、MRF904 等。
8) TO-78 型封装		采用此封装的器件有 2N4854、2N5796U 等。
9) TO-92 型封装	 <div>漏极 源极 门极</div>	<div>(1) TO-92 型封装外形一般用于耗散功率为 250~750mW 的晶体管，型号有 KSP8099、S9018、2N5401、2SC945、2SA1015、KSC2331、2N3819、2N6028RLRP 等。</div> <div>(2) TO-92L 型封装外形用于耗散功率为 50mW~1.2W 的晶体管，型号有 S8550、2SA910、2SC2060、2SD1384、2SB1010 等。</div> <div>(3) TO-92LS 型封装外形一般用于耗散功率为 800~900mW 的晶体管，型号有 2SC4720、2SA1819、2SB1596T、2SD2451 等。</div>
10) TO-126 型封装		封装外形与国产 S-5 型相似，一般用于耗散功率为 10W 左右的晶体管，型号有 2SC2688、MMBTH10、BD136、BD138、BD140、2SB772T、2SB1065、2SD1380 等。

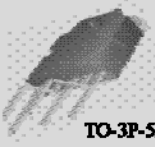



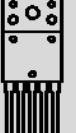
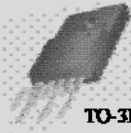
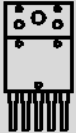
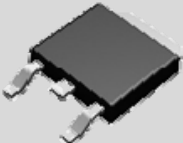
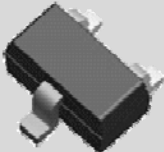
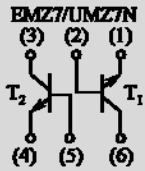
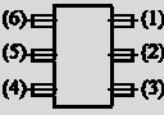
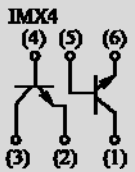
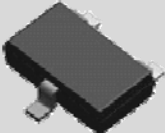


	
<p>11) TO-201 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件有 IN5400~IN5408 等。</p>
<p>12) TO-202 型封装</p> 	<p>外形与国产 S-6 型相似。采用 TO-202 型封装的晶体管型号有 S2010F1、S4010F1、S6010F1、2SC1249、T107M1、T106D1、S2010FS31、S4010FS31 等。</p>
<p>13) TO-204AE (TO-3) 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 2N6763、2N6764、2N6762 等。</p>
<p>14) TO-208AC 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 CS35-12I04、CS35-14I04 等。</p>
<p>15) TO-214AA/AC 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 K1500S、K2000S、K2500S、SS12、SS100、1N4148 等。</p>
<p>16) TO-218 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 S2055W、S4055W、S6055W、S8055WS2055M、S4055M、S6055M、S8055M 等。</p>
<p>17) TO-220 型封装</p> 	<p>外形与国产的 S-7B 型相似。此种封装的晶体管型号有 TIP29、KSA940、2SA562、2SB546、2SC1815、2SD1138、S9015、BC337、C1008、MPSA92、MJE3055、D880、3CG940、DS31、BU406、D880-Y 等。</p>

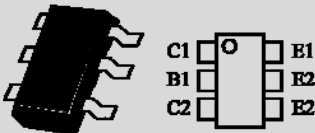
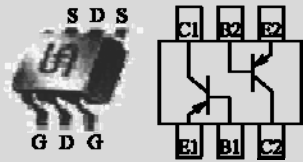
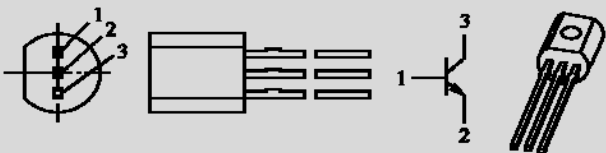
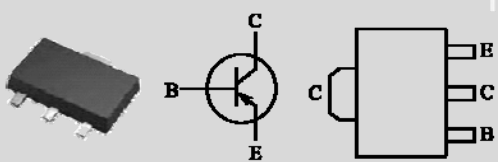

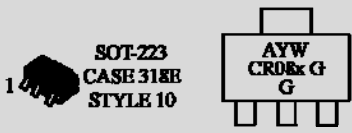
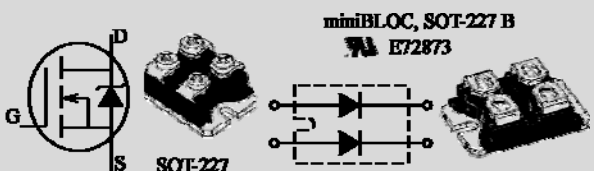
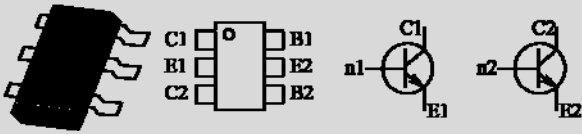
<p>18) TO-220AB/AB-5</p>  <p>Diagram showing the TO-220AB/AB-5 package. It is a three-pin package with a tab. The pins are labeled: 1-基极 (Base), 2-集电极 (Collector), 3-发射极 (Emitter), and 4-集电极 (Collector). The package is labeled IO-220AB-5.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 IRF840、IRF540NPBF、IRF3205PBF、SKP06N60、TYNx12T、SKP15N60、TYN612MRG、TYN1040RG、BTB04-600SL、BTA16-600BRG 等。</p>
<p>19) TO-220AC</p>  <p>Diagram showing the TO-220AC package. It is a three-pin package with a tab. The package is labeled TO-220AC (外部引脚). Other labels include TO-220AC and TO-220ACFP.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 MUR820、MUR840、MUR860、RHRP15120、RHRP8120 等。</p>
<p>20) TO-220F/ABFP 型封装</p>  <p>Diagram showing the TO-220F/ABFP package. It is a three-pin package with a tab. The package is labeled TO-220F. Other labels include TO-220F and TO-220F.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 STP75NF75T4、FQPF12N60C、TYN612MFP、FKPF2N80、TIP41C 等。</p>
<p>21) TO-220F-5 型封装（底板绝缘）</p>  <p>Diagram showing the TO-220F-5 package. It is a three-pin package with a tab. The package is labeled TO-220F-5. Other labels include TO-220F-5 and TO-220F-5.</p>	<p>TO-220FP 型封装的晶体管较 TO-220F 型顶部多出 2mm 的凸棱，其耗散功率与 TO-220FN 型封装晶体管相同。采用此封装的晶体管型号有 2SC4008、2SA1635、2SB1185、2SD1762 等。</p>
<p>22) TO-220F/FP 型封装</p>  <p>Diagram showing the TO-220F/FP package. It is a three-pin package with a tab. The package is labeled TO-220ACFP. Other labels include TO-220ACFP and TO-220ACFP.</p>	<p>采用此封装的器件有 FQPF8N60C、FQPF5N60C、STGP7NB60HDFP、STP11NK50ZFP、STGF7NC60HD 等。</p>

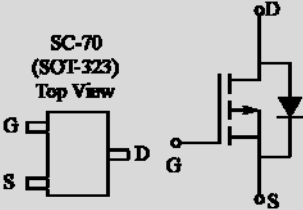

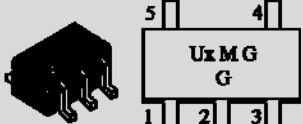
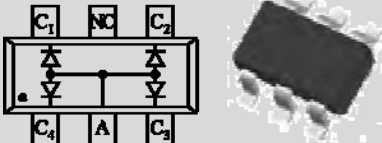
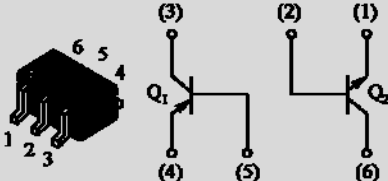
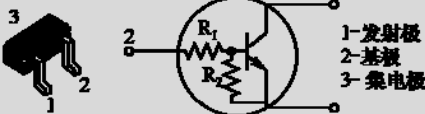
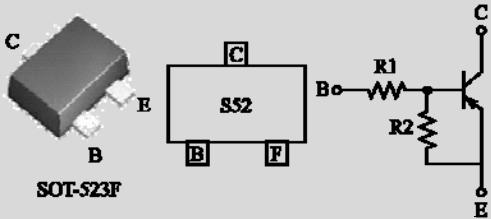
<p>23) TO-220C 型封装</p>  <p>The image shows a TO-220C package with three leads labeled 1, 2, and 3. To the right is a circuit symbol for a transistor with terminals 1, 2, and 3.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 BUT11A。</p>
<p>24) TO-225AA 型封装</p>  <p>The image shows a TO-225AA package with three leads. The top of the package is labeled 'YWW' and 'C106xxG'.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 C106 系列。</p>
<p>25) TO-226AA 型封装</p>  <p>The image shows a TO-226AA package with three leads labeled 1, 2, and 3. To the right is a pinout diagram with labels: 1-发射极 (Emitter), 2-基极 (Base), 3-门极 (Gate).</p>	<p>采用此封装的器件型号有 ZN7000、MPF102 等。</p>
<p>26) TO-236/AA 型封装</p>  <p>The image shows a TO-236/AA package with three leads labeled 1, 2, and 3. To the right is a circuit symbol for a transistor with terminals 1, 2, and 3.</p>	<p>采用此封装的器件有 AO3402L、2N7002、MSC2295、BAS21、BAS20、MMBV109LT1、MMBV109LT1G 等。</p>
<p>27) TO-236MOD 型封装</p>  <p>The image shows a TO-236MOD package with three leads labeled 1, 2, and 3. To the right is a circuit symbol for a transistor with terminals 1, 2, and 3. The symbol also includes labels: 1-发射极 (Emitter), 2-基极 (Base), 3-集电极 (Collector).</p>	<p>采用此封装的器件有 MUN2234T1、MUN2237T1、MUN2211T1~MUN2216T1、MSC2295-BT1、MUN2236T1、MSC2295-CT1 等。</p>
<p>28) TO-247 型封装</p>  <p>The image shows a TO-247 package with three leads labeled 1, 2, and 3. To the right is a pinout diagram with labels: 1-发射极 (Emitter), 2-基极 (Base), 3-集电极 (Collector).</p>	<p>多为 TO-220 型的大功率（60~100W）晶体管的封装外形。采用此封装的晶体管型号有 2SD2236、2SB1345、HGTG11N120CND、HGTG30N60A4D、SPW47N60C3、RHRG30120、SPW17N80C3 等。</p>
<p>29) TO-247AD 型封装</p>  <p>The image shows a TO-247AD package with three leads labeled 1, 2, and 3. To the right is a pinout diagram with labels: 1-发射极 (Emitter), 2-基极 (Base), 3-集电极 (Collector).</p>	<p>采用此封装的器件型号有 IXSH50N60B、CS45-16I01 等。</p>

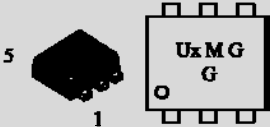

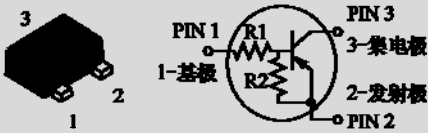
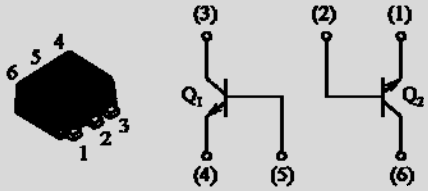
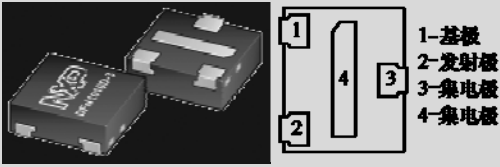
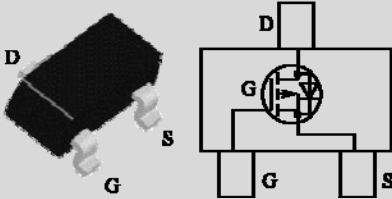
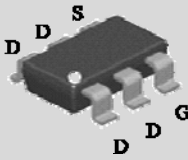
<p>30) TO-247AC 型封装</p>  <p>TO-247AC</p>	<p>采用此封装的器件型号有 IRG4PF50 WPbF、IRG4PC40U、SKW15N60、40TPS08A、40TPS12A、40TPS08、40TPS12A 等。</p>
<p>31) TO-247-4L 型封装</p>  <p>TO247-4L HV</p> <p>DS10245</p> <p>DS10155</p>	<p>采用此封装的器件型号有 STC03DE170 HV、STC08DE150HV 等。</p>
<p>32) TO-251 (V-PAK) 型封装</p>  <p>TO-251</p>	<p>采用此封装的器件型号有 TS1220-xxxH、TN1215-xxxH、S2004VS1、TN805-xxxH、TS820-xxxH、S2012V、S4012V、S6012V、S8012V、S6010VS2、S2010VS3、S4010VS3 等。</p>
<p>33) TO-252 型封装</p>  <p>TO-252</p>	<p>采用此封装的器件型号有 STB75NF75T4、STGF7NC60HDT4、S2004DS1、S4004DS1、TN805-xxxB、S6012D、S8012D、SK012D、S6010DS2、S2010DS3 等。</p>
<p>34) TO-252AA 型封装</p>  <p>TO-252AA</p>	<p>采用此封装的器件型号有 ISL9V3040D3S、SGD02N120、STGD14NC60K、TN1215- xxxB 等。</p>
<p>35) TO-263/AB/AB-5 型封装</p>  <p>TO-263AB</p> <p>TO-22AB-5</p> <p>TO-263</p>	<p>一般用于耗散功率为 35W 的大功率晶体管，采用此封装的晶体管型号有 TN1215-xxxG、S2025N、S4025N、S6025N、S8025N、2SA1870、2SC4938、TN2540-xxxG、BTA16-600BRG 等。采用此封装的器件型号有 ISL9V3040S3S、SGI02N120、STGB14NC60K、IRF840AS、SKB06N60、SKB15N60、25TTS12S、25TTS16S、Q8012NH5、QK012NH5 等。</p>


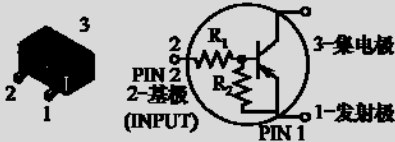
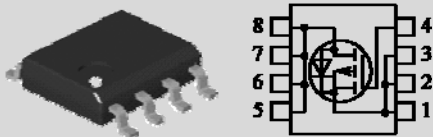
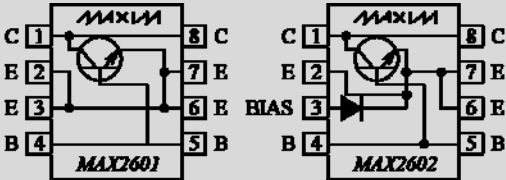

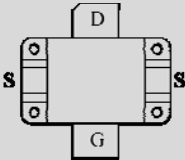
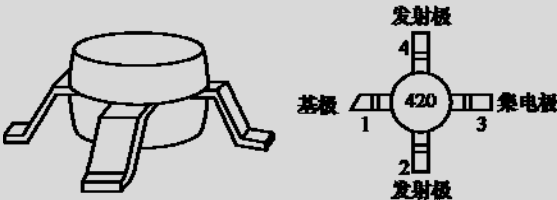
<p>36) TO-264 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 FGL60N100BNTD。</p>
<p>37) TO-264AA 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 IXFK、IXFN 44 N50 (模块)、IXFK / IXFN 48 N50 (模块) 等。</p>
<p>38) TO-3 型封装</p> 	<p>它与国产管的 F-2 型封装外形基本相同。</p> <p>采用此封装外形的晶体管有薄管壁 (管壁为 1.5mm) 和厚管壁 (管壁为 3mm) 之分, 型号有 BU208D、BU932R、2SD870、3DD15D 等。</p>
<p>39) TO-3P/3PL/3P-5L/3PF-5L 型封装</p> 	<p>分为 TO-3P (A) ~ TO-3P (E) 等多种规格。此封装一般用于各种高压或大功率 (耐压值 800V 以上或耗散功率 100W 以上) 晶体管, 型号有 KSD1047、KSB817、TIP145、FQA9N90C_F109、KSC5047 等。</p>

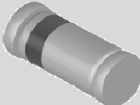
<div><div><p>TO-3P-5L</p></div><div><p>TO-3P-5L (双列引脚)</p></div><div><p>TO-3PFM</p></div><div><p>TO-3PF-5L</p></div><div><p>TO-3PF-5L (单列引脚, 底板绝缘)</p></div><div><p>TO-3PF-5L</p></div><div><p>TO-3PF-5L (双列引脚, 底板绝缘)</p></div></div>	
<div>40) CPT/3 型封装</div> <div></div>	<p>一般用于功率为 10~15W 的晶体管。采用 CPT 型封装的晶体管型号有 2SA1862、2SAR572DRTL、2SC5001、2SB1182、2SAR572D、2SD2318 等。</p>
<div>41) EMT3/6 型封装</div> <div><div></div><div></div></div>	<p>采用此封装的器件型号有 2SA1774、EMX4、EMZ7、EMT18T2R 等。</p>
<div>42) SMT6/3 型封装</div> <div><div></div><div></div><div></div></div>	<p>采用此封装的器件有 IMX4、EMZ8、RHK003N06FRA、IMD10AT108 等。</p>
<div>43) MELF 型封装</div> <div></div>	<p>采用此封装的器件型号有 SM4947、SM4948、SM4005、SM4006、SM4007、SM4004、DL4728A、DL4736A 等。</p>
<div>44) SOT-23 型封装</div> <div><div><p>G D S</p></div><div>SOT-23</div></div>	<p>采用 SOT-23 封装的三极管型号有 BCW71 (K1)、BCX71K、KST4401、BSS138、S8550、MMBTA44、BC846B、MMBTA42、FDV301N、MMBFJ309、MMBFJ310、BZX84C2V4、BZX84C75 等。</p>
<div>45) SOT23-6 型封装</div>	<p>采用此封装的器件型号有 ZXTD6717E6TA、ZXTD6717E6TC、ZXTC2045E6TA、</p>

	ZXTC2062E6TA、ZXTD6717E6TC 等。
46) SOT-26 型封装 	采用此封装的器件型号有 LMN200B01-7、LMN400B01-7、IMX8-7、IMT17-7、LBN150B01-7、DMB2227A-7、MMDTA42-7-F、DMMT5551、DMMT5551S、IMT4-7-F、DMMT2907A-7 等。
47) SOT-54 型封装 	采用此封装的器件型号有 BF199、BC549 等。
48) SOT-89 型封装 	采用此封装的器件型号有 2DB1132P-11、2DB1132P-13、2DB1132Q-13、2DB1132R-13 等。
49) SOT-143 型封装 	采用此封装的器件型号有 AT-41511、AT-32011、NE68039、AT-32033 等。
50) SOT-223 型封装 	采用此封装的器件有 MCR08BT1、MCR08BT1G、MCR08MT1、MCR08MT1G、PZT2222A 等。 多用于小电机控制、继电器和电灯驱动、晶闸管触发。
51) SOT-227/B 型封装 	采用此封装的器件有 FA575A50LC（模块）、APT20M11JVFR、APT60M75JVR、APT60M60JFLL、DSEI2X61-06C 等。
52) SOT-236 型封装 	采用此封装的器件型号有 ZXTD09N50DE6TC、ZXTD09N50DE6TA、ZXTD4591E6TA、ZXTD4591E6TC 等。

<div>53) SOT-323 型封装</div> <div></div>	<p>采用此封装的器件型号有 AO7401、NE68030、NE68830、2SC5193、MSC3930、MUN5133T1G、DDTC144EUA-7-F、DDTA123TUA-7、ZUMTS17NTA 等。</p>
<div>54) SOT-343 型封装</div> <div></div>	<p>采用此封装的器件有 ATF-55143、ATF-54143、NE68018、BFP650 等。</p>
<div>55) SOT-353 型封装</div> <div></div>	<p>采用此封装的器件有 UMC2NT1G、UMC3NT1G、UMC5NT1G 等。</p>
<div>56) SOT-363 型封装</div> <div></div>	<p>采用此封装的器件型号有 QZX363C15、QZX363C6V8、BZX84C15S-7-F、MMBZ5221 BS、QZX363C20、DMB53D0UDW-7、CTA2 N1P-7、MMDT4413-7-F、BC857BDW1T1、BC857CDW1T1、HBDM60V600W-7 等。</p>
<div>57) SOT-363-6 型封装</div> <div></div>	<p>采用此封装的器件型号有 MBT3946 DW1T1 等。</p>
<div>58) SOT-416 型封装</div> <div></div>	<p>采用此封装的器件型号有 DTC144WET1、DTC123JET1G、DTC124XET1、DTC124EET1、DTC114EET1 系列、DTA144EET1G 等。</p>
<div>59) SOT-523F 型封装</div> <div></div>	<p>采用此封装的器件有 FJY4002R、FJY3004R、FJY4014R、FJY4010R、DDTC123YE-7-F 等。</p>

<p>60) SOT-553 型封装</p>  <p>The image shows a 3D perspective of a SOT-553 package with pins 1 and 5 labeled. To its right is a pinout diagram for a UxMG G transistor, showing a central base pin (1) and four surrounding collector pins (5).</p>	<p>采用此封装的器件型号有 EMC2DXV5T1G 、 EMC3DXV5T1G 、 EMC4DXV 5T1G、EMC5DXV5T1G 等。</p>
<p>61) SOT-563 型封装</p>  <p>A 3D perspective of a SOT-563 package with pins 1 and 6 labeled.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 NST3904DXV6T1、NST3904DXV6T5EMZ1DXV6T1、EMZ1DXV6T5、BC847CDXV6T1G、BC847CDXV6T5G 、 BC848CDXV6T1G 、 MMDT3904V-TP 等。</p>
<p>62) SOT723 型封装</p>  <p>The image shows a 3D perspective of a SOT723 package with pins 1, 2, and 3 labeled. To its right is a pinout diagram for a transistor, showing a central base pin (1), an emitter pin (2), and a collector pin (3), with internal resistors R1 and R2.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 DTA124XM3T5G。</p>
<p>63) SOT-963 型封装</p>  <p>The image shows a 3D perspective of a SOT-963 package with pins 1, 2, 3, 4, 5, and 6 labeled. To its right is a pinout diagram for a transistor, showing a central base pin (1), an emitter pin (2), and a collector pin (3), with internal resistors R1 and R2.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 NST3904DP6T5G、DST3904DJ-7、DST857BDJ-7、NST857BDP6T5G、DST3946DPJ-7、DN0150BDJ-7、DN0150ADJ-7 等。</p>
<p>64) SOT1215 型封装</p>  <p>The image shows a 3D perspective of a SOT1215 package with pins 1, 2, 3, and 4 labeled. To its right is a pinout diagram for a transistor, showing a central base pin (1), an emitter pin (2), and a collector pin (3), with internal resistors R1 and R2.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 PBSS4130QA。</p>
<p>65) SUPER SOT-3 型封装</p>  <p>The image shows a 3D perspective of a SUPER SOT-3 package with pins D, S, and G labeled. To its right is a pinout diagram for a transistor, showing a central base pin (1), an emitter pin (2), and a collector pin (3), with internal resistors R1 and R2.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 NDS352AP、NDS351AN 等。</p>
<p>66) SUPER SOT-6 型封装</p>  <p>A 3D perspective of a SUPER SOT-6 package with pins D, S, and G labeled.</p>	<p>采用此封装的器件型号有 FDC634P、FMB5551 等。</p>

<div>67) VML0805 型封装</div> <div></div>	<div>采用此封装的器件有 RA523V1、DTA214EV1 等。</div>
<div>68) SC-59 型封装</div> <div></div>	<div>采用此封装的器件有 MUN2111T1、MUN2114T1G、MUN2140T1 等。</div>
<div>69) SO-8 型封装</div> <div></div>	<div>采用此封装的器件有 FDS4435A、FDS9435A、FDS4410、Si4410DY、Si4410DY、NDS9435A、FDS6670A 等。</div>
<div>70) SOIC 型封装</div> <div></div>	<div>采用此封装的器件有 MAX2601、MAX2602、NSS40302PDR2G 等。</div>
<div>71) M174 型封装</div> <div></div>	<div>采用此封装的器件有 VRF152。</div>
<div>72) 无凸缘封装</div> <div></div>	<div>采用此封装的器件有 VRF157FL。</div>
<div>73) 塑料封装</div> <div></div>	<div>采用此封装的器件有 AT-42086、AT-41486、AT-42086-TR1G 等。</div>

<p>74) 晶体管阵列</p> 	<p>采用此封装的器件有 LM3045、LM3046、LM3086 等。</p>
<p>75) COMPAK 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 S6S、S2S3、S4S3、S6S3、S2N1、S4N1、S6N1、S4S2、L4N5、L6N5 等。</p>
<p>76) S06 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 UPA802T、UPA811T、UPA810T-T1 等。</p>
<p>77) RD91 型封装</p> 	<p>用于大功率晶体管的封装，型号有 BTW67-xxx。在电机控制、固态继电器中广为应用。</p>
<p>78) TOP3 Ins 型封装</p> 	<p>用于大功率晶体管的封装，型号有 BTW69-xxxRG。在电机控制、固态继电器中广为应用。</p>
<p>79) SOD123 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 MBR0520 LTIG、MBR0520LT3 等。</p>
<p>80) SOD-80C 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 LL4148。</p>
<p>81) SOD323 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 MM3Z16VT1G、MM3Z16VT1、SMV1255-011LF、SMV1255-011、ZMV934TA 、 ZMV934ATAZMV835ATA 、 ZMV835BTA 等。</p>
<p>82) SOD523 型封装</p> 	<p>采用此封装的器件型号有 ZV831BV2TA、ZV832BV2TA 等。</p>

83) DFN3020B-8 型封装	采用此封装的器件型号有 ZXTC6718MCTA、ZXTC4591AMCTA、ZXTD720MCTA 等。
84) 14 PIN FLAT PACK 型封装	采用此封装的器件有 2N6988、2N6990。
85) 微 X 型封装	用于微波、低功耗晶体管，型号有 MRF581、MRF581A 等。

四、晶体管各种封装形式对照表

国际通用	中 国	欧 美	其他 1	其他 2	其他 3
TO-3	F-2		TO-204AA		
TO-3P/PN			SC-65		CASE340AB
TO-18	B 型				
TO-25		SOT-353	SC-88A		CASE-419A
T0-26		SOT-363			
TO-41				DO-204AL	
TO-46					CASE59-10
TO-66	F-1			PT-1	
TO-92	B-4	SOT-54	SC-43	TO-226AA	CASE029
TO-92S			SC-72	SPT	
TO-92L	S-1				
TO-92LS	S-4				
TO-126	S-5	SOT-82			
TO-202	S-6				
TO-202AA	S-7	SOT-128B	SC-53		
TO-208			SC-60		
T0-218		SOT-93			
TO-220/AB	S-7B	SOT-78	SC-46		
TO-220AC					CASE221B
TO-220AD					TO-AC220A
TO-220FN		SOT-186	SC-67		
TO-220F/ABFP		SOT-186A	SC-67		
TO-220FP		SOT93			
TO-236		SOT-23			CASE-318

续表

国际通用	中 国	欧 美	其他 1	其他 2	其他 3
TO-243		SOT-89	SC-62	MPT3	U-PAK
TO-236MOD		SOT-346	SC-59	SMT3	M-PAK, CASE-318D
TO-236AB		SOT-23		SST3	
TO-247		SOT-429			
TO-251			SC-64		I-PAK
TO-252		SOT-428	SC-63	CPT3	D-PAK
TO-263			D2PAK	PSD	
TO-264				CASE340G	TO-3PBL
			SC-70		UMT
	F-5		SC-63		CPT
		SOT-143R	SC-61B		
		SOT-223	SC-73		DFN2020MD-6
		SOT-227B		E72873	
		SOT-323	SC-70	UMT3	CMPAK、CASE419
		SOT-353	SC-88A	UMT5	CASE-419A
		SOT-363/6	SC-88	UMT6	CASE419B
		SOT-416	SC-75A	EMT3	SMPAK, DFN1006
			SC-75		CASE463
		SOT-457	SC-74	SMT6	DFN1010D-3
		SOT-490	SC-89		
		SOT-553			CASE463B
		SOT-563			CASE463A
		SOT-723			CASE631AA
		SOT-753	SC-74A	SMT5	SMD5
		SOT-963			CASE527AD
		SOT-1123			CASE524AA
		SOT1215			DFN1010D-3
				SOD123	CASE425
				SOD323	CASE477
				SOIC-8	CASE751